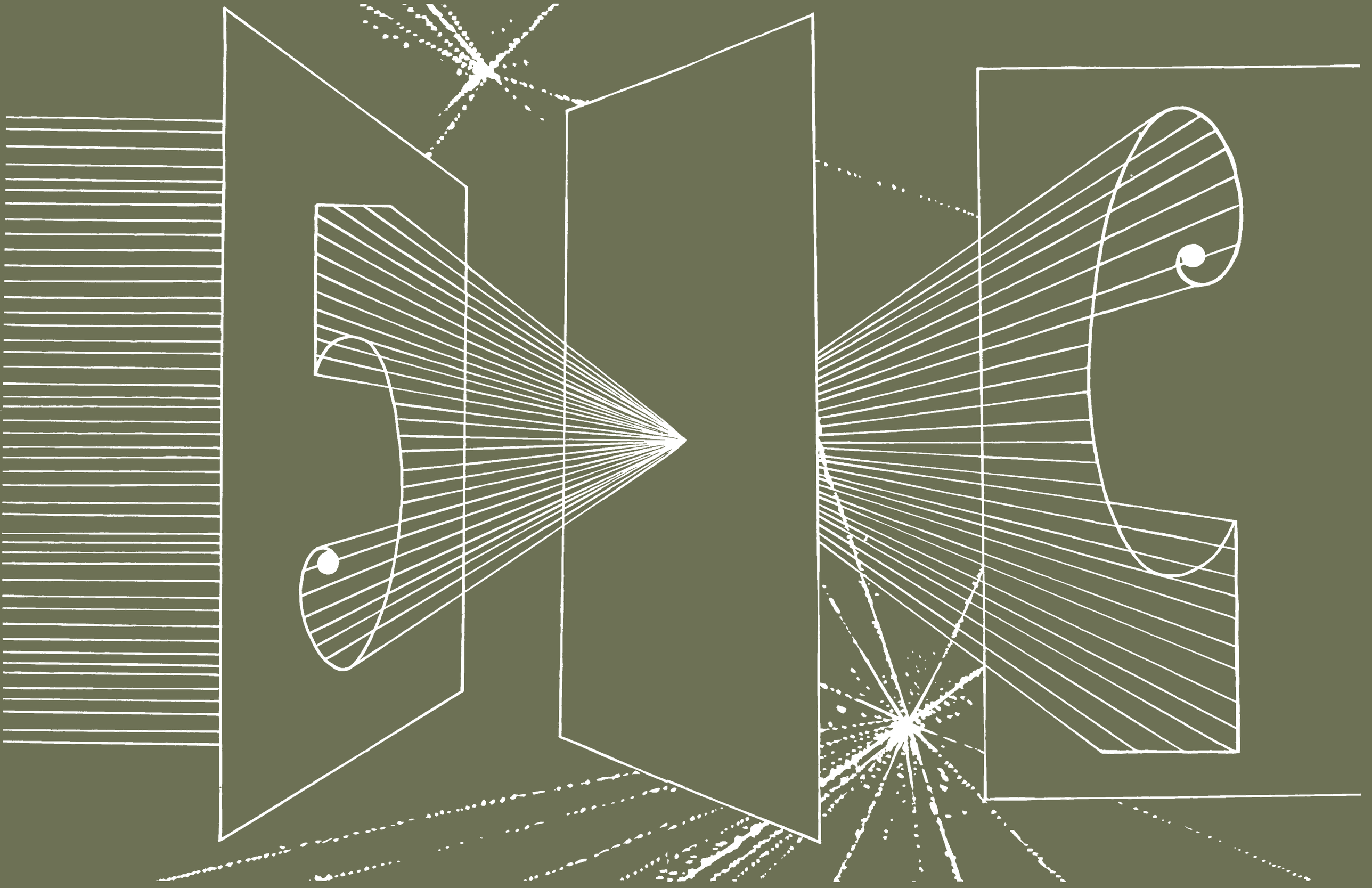
# Детская энциклопедия

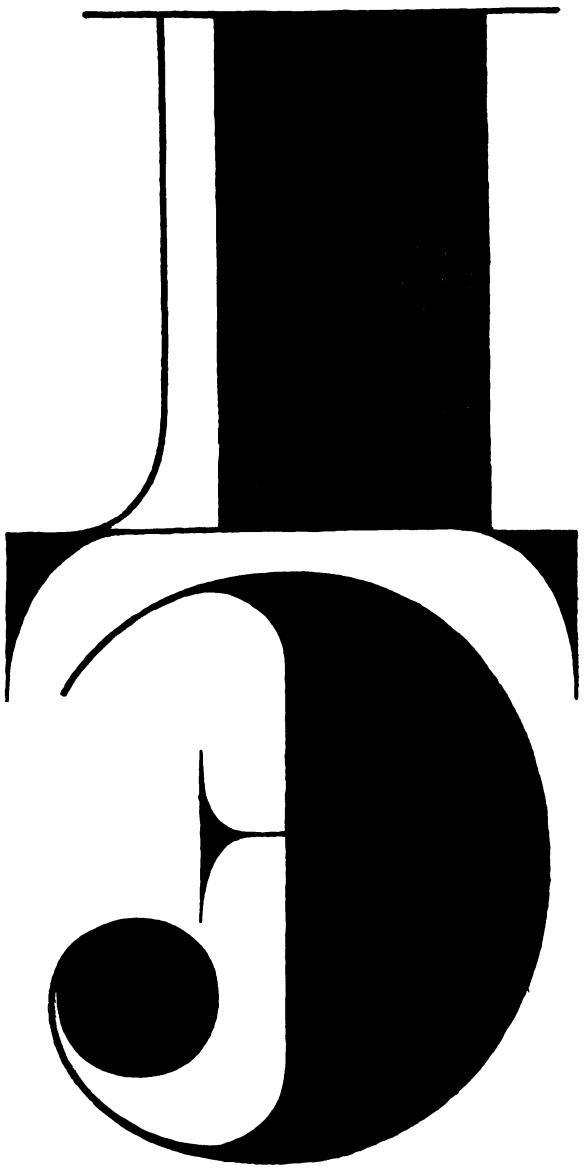
3



**Коммунистом стать можно лишь тогда, когда обогатишь свою память знанием всех тех богатств, которые выработало человечество.**

**В. И. ЛЕНИН**

# Вещество и энергия



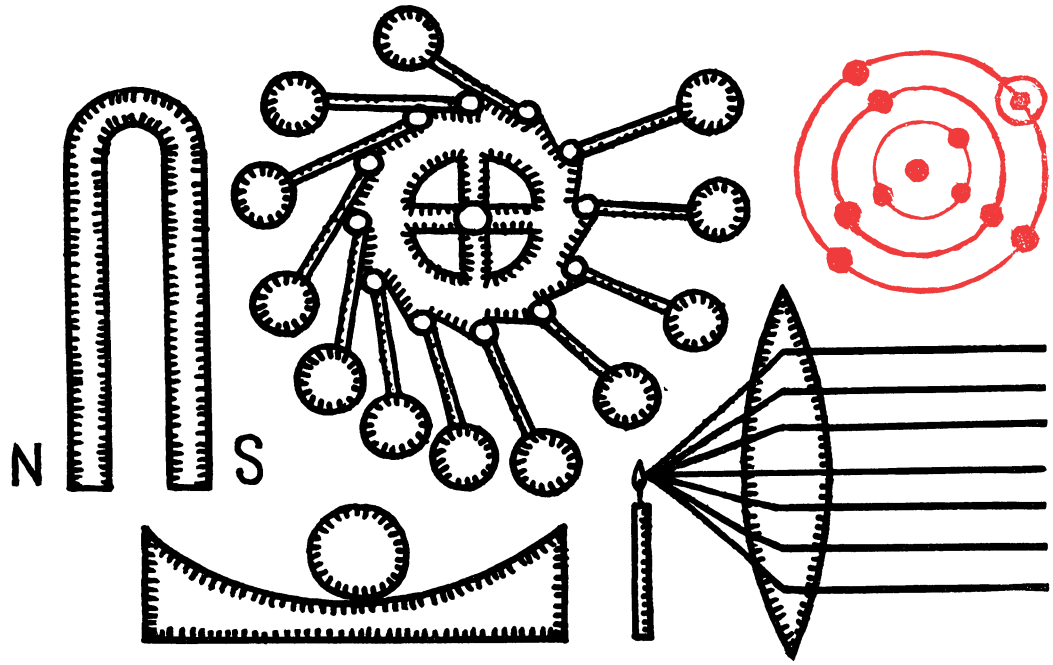
АКАДЕМИЯ
ПЕДАГОГИЧЕСКИХ
НАУК РСФСР

ТОМ

3

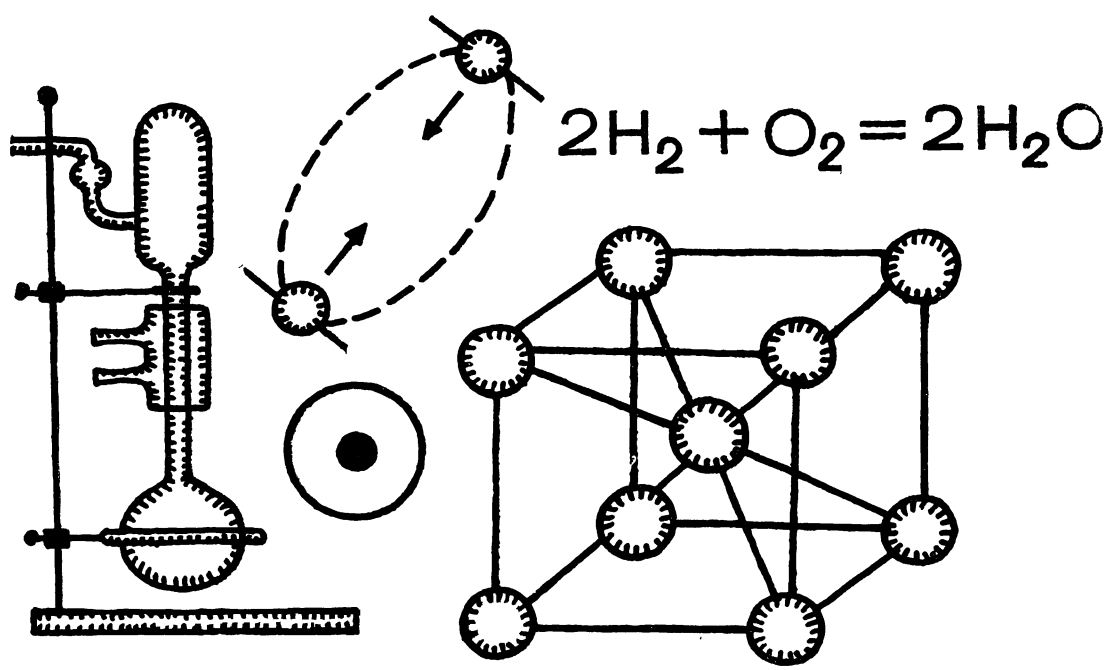
Второе издание

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
Москва
1966




# етская нциклопедия

ДЛЯ СРЕДНЕГО
И СТАРШЕГО ВОЗРАСТА

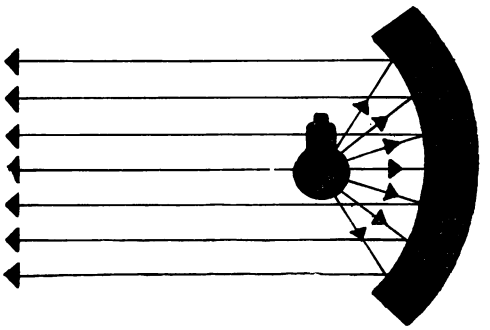


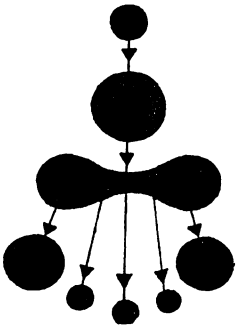
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

Е. И. Афанасенко, Д. Д. Благой, Б. А. Воронцов-Вельяминов, П. А. Генкель, Ф. В. Герасин, Н. К. Гончаров, Б. А. Дехтерев, Г. Н. Джибладзе, А. В. Ефимов, К. А. Иванович, И. А. Каиров, Л. А. Кассиль, М. П. Ким, Н. П. Кузин, А. Н. Леонтьев, А. Р. Лурия, А. А. Маркосян, А. И. Маркушевич (Главный редактор), В. А. Мезенцев, С. В. Михалков, М. В. Нечкина, С. В. Образцов, Б. П. Орлов, И. В. Петрянов, С. Д. Сказкин, Ф. Д. Сказкин, А. А. Смирнов, А. И. Соловьев, И. М. Терехов, Л. И. Тимофеев, С. Л. Тихвинский, Т. С. Хачатуров, Ю. В. Ходаков, Е. М. Чехарин, К. И. Чуковский, Б. Н. Шацкая, Д. И. Щербаков, Д. А. Эпштейн, А. Н. Яковлев.

Научный редактор 3-го тома
И. В. Петрянов.

Заместители Главного редактора
Б. Л. Бараш, И. В. Латышев.



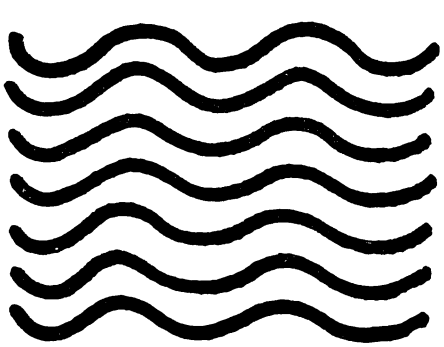


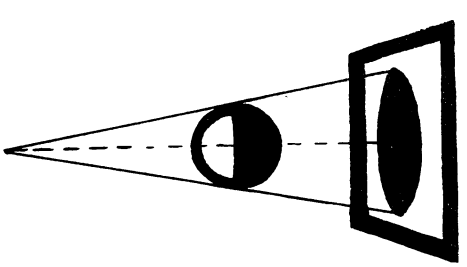
# СОДЕРЖАНИЕ

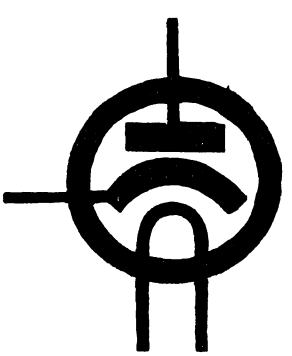

Без физики и химии вам не обойтись — Н. Н. Семенов . . . . . 14

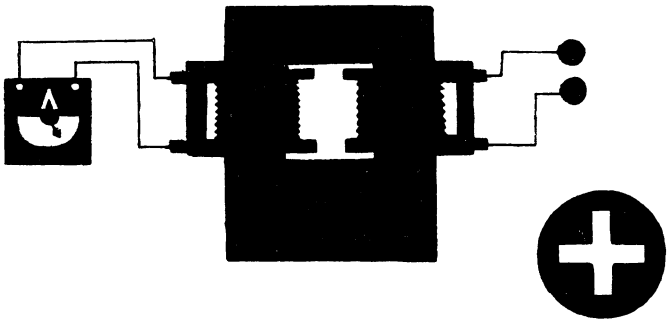
## Движение и энергия

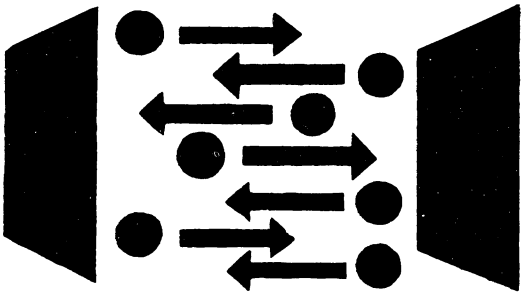
Основы механики наших дней — А. П. Мицкевич . . . . . 23
Равномерное движение . . . . . 23
Неравномерное движение . . . . . 25
Законы природы и системы отсчета . . . . . 27
Сила . . . . . 28
Колебания . . . . . 31
От механики классической к механике релятивистской . . . . . 32
«Волчок» . . . . . 34
Полет в космосе — И. А. Минасян . . . . 35
Формула Циолковского . . . . . 35
От огненных стрел до баллистических ракет . . 37
Исследовательские ракеты — орудие науки 41
Первенцы космоса . . . . . 42
Запуск спутников в США . . . . . 43
Автоматические межпланетные станции . . . 44
К Венере и Марсу . . . . . 46
Оборудование космических лабораторий . . . 50
На космодроме . . . . . 51
Устройство корабля «Восток» . . . . . 53
Многоместный космический корабль «Восход» 54
За бортом космического корабля . . . . . 55
Невесомость . . . . . 58
Микроклимат . . . . . 60
Радиосвязь . . . . . 60
Спуск с орбиты . . . . . 61
Проблемы будущего . . . . . 63
Крылатый полет — Г. В. Александров 64
Аппараты легче воздуха . . . . . 64
Почему летает самолет . . . . . 66
«Звуковой барьер» и «тепловой барьер» . . . 67
Законы аэродинамики и обтекание крыла 68
Как проверяют результаты расчетов . . . . 71
Авиационные двигатели . . . . . 72
Как выбирают размеры самолета . . . . . 74
Как управляют самолетом . . . . . 75
Устойчивость самолета . . . . . 76
Прочность и безопасность . . . . . 78
Крылатые ракеты . . . . . 78
Пути дальнейшего развития авиации . . . . 79
Человек покоряет океан — С. З. Ушаков 80
Тайна острова Пасхи . . . . . 80
Как жидкости встречают «гостей» . . . . . 81
Давление жидкости . . . . . 81
Как обойтись без высшей математики . . . . 83
Архимед и его открытие . . . . . 84
Плавание — это равновесие . . . . . 84
Плавание под водой . . . . . 85
Плавание на поверхности воды . . . . . 87
Упрямое полено . . . . . 88
Центр давления «путешествует» . . . . . 88
Метацентр . . . . . 88
Водоизмещение . . . . . 89
Корабельный академик Крылов . . . . . 89
Атомный ледокол «Ленин» . . . . . 90
Как движется корабль? . . . . . 90

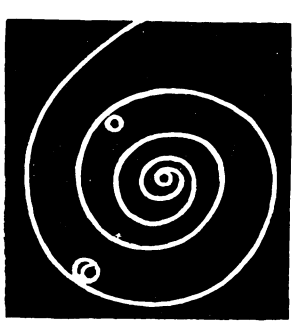


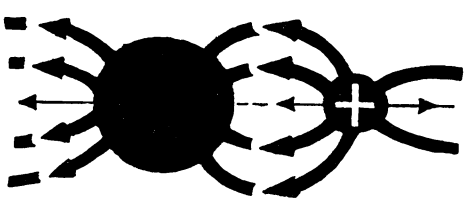


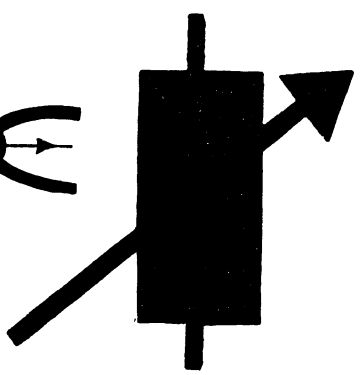


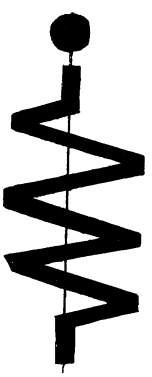


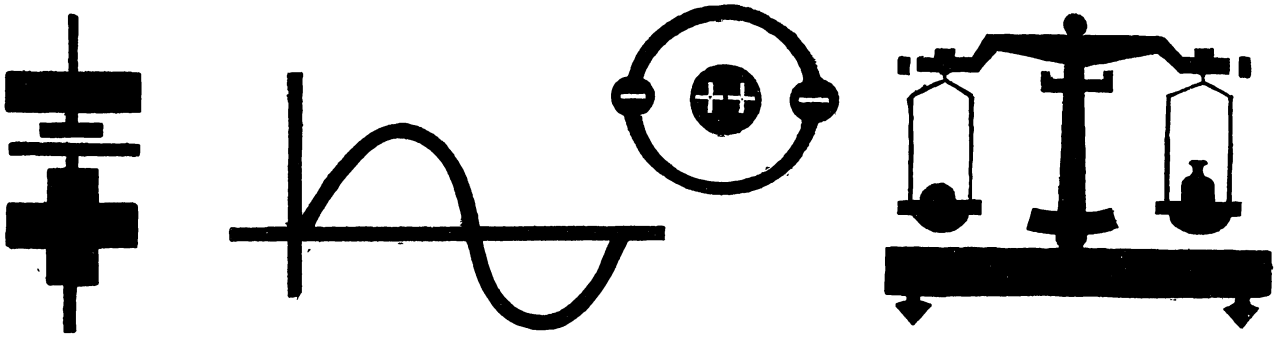

Звук — А. А. Коробко-Стефанов . . . 92
Звуковая волна . . . . . 93
Как измерили скорость звука . . . . . 94
Распространение и отражение звука . . . . . 95
Энергия звуковой волны и сила звука . . . . 96
Энергия человеческого голоса . . . . . 97
Наше ухо . . . . . 97
Загадка нашего слуха . . . . . 98
Еще более удивительная загадка . . . . . 98
Слух и логарифмы . . . . . 98
Громкость звука и его тон . . . . . 99
Откуда пришел звук? . . . . . 99
Эффект Доплера . . . . . 99
Ударная волна . . . . . 100
Резонаторы . . . . . 100
Музыкальные звуки . . . . . 101
Музыкальные созвучия . . . . . 102
Обозначение музыкальных звуков . . . . . 104
Передача звуков на расстояние и запись звуков . . . . . 104
Неслышимые «звуки» . . . . . 108
Излучатели ультразвука . . . . . 109
Звук на службе у человека . . . . . 110
Вещество в звуковом поле . . . . . 111
Кавитация . . . . . 112
Ультразвук на стройке . . . . . 113
Ультразвук режет металл . . . . . 113
Ультразвук в медицине . . . . . 114
На подступах к абсолютному нулю — М. П. Малков, И. Б. Данилов . . 114
Что такое холод? . . . . . 114
Гелий превращается в жидкость . . . . . 115
Квантовые свойства веществ . . . . . 116
Сверхпроводимость . . . . . 116
Сверхтекучесть . . . . . 119
Наинизшая температура . . . . . 120
Сто миллионов градусов — Г. Б. Анфилов 120
Пятьсот тысяч атмосфер — Д. С. Циклис 127
Что такое давление? . . . . . 127
Каков предел давления? . . . . . 128
Как создают давление? . . . . . 128
Какое давление может выдерживать сам аппарат? . . . . . 129
Полиморфные переходы . . . . . 131
Давление и химические реакции . . . . . 133
Что нужно знать, чтобы построить химический завод? . . . . . 134
Давление и живые организмы . . . . . 134
Пластичный мрамор . . . . . 135
Наука о высоких давлениях . . . . . 135
Наука, необходимая всем (Термодинамика) — И. Р. Кричевский, И. В. Петрянов 135
Что такое термодинамика . . . . . 136
Основные понятия термодинамики . . . . . 137
Закон термического равновесия . . . . . 150
Первый закон термодинамики . . . . . 150
Второй закон термодинамики . . . . . 154
Энтропия . . . . . 160
Зачем нужно понятие «энтропия» . . . . . 162
Третий закон термодинамики . . . . . 166
Свет — В. И. Кузнецов . . . . . 168
Что мы понимаем под словом «свет» . . . . . 168
Световые лучи . . . . . 168
Самая большая скорость . . . . . 170
Откуда берется цвет? . . . . . 171
Открытие Максвелла . . . . . 171
Волшебный прибор . . . . . 172
Устройство спектроскопа . . . . . 172
Как спектроскоп обнаруживает химический элемент . . . . . 173
Солнечная загадка . . . . . 174
Абсолютно черное тело . . . . . 174

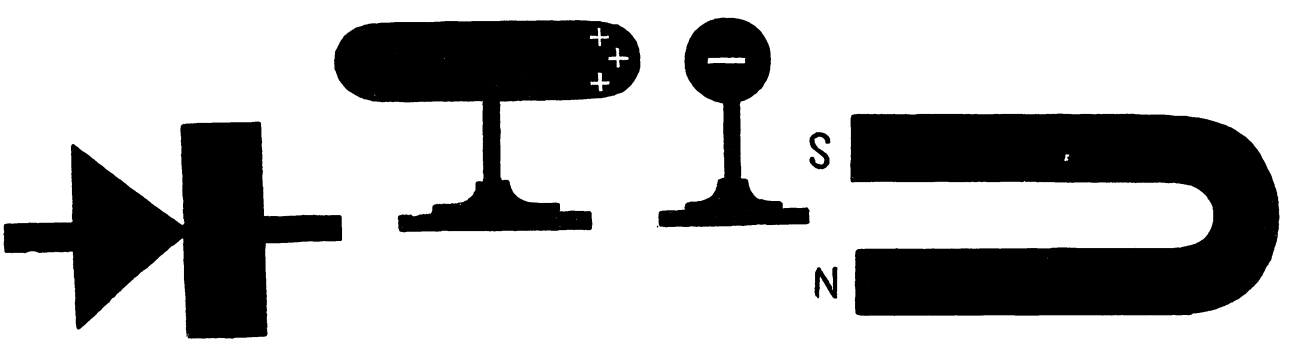


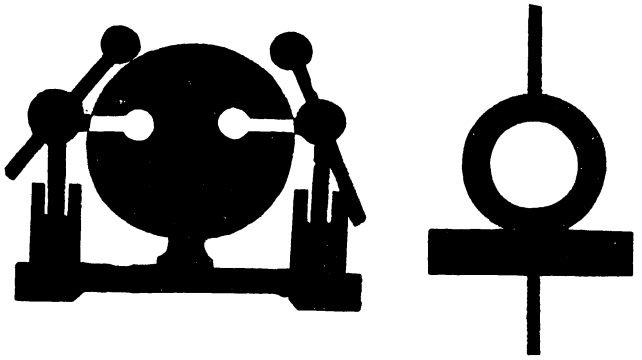


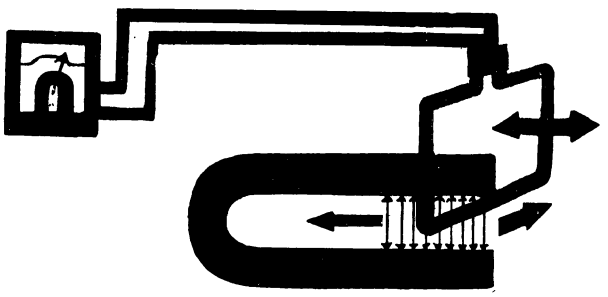





Как измерили температуру Солнца . . . . . 175
Ультрафиолетовая катастрофа . . . . . 176
Давление света . . . . . 177
В глубь атома . . . . . 178
Мог ли сжечь корабли Архимед? . . . . . 179
Лазер . . . . . 180
Поющие электроны . . . . . 183
Как измерили длину световой волны . . . . . 185
Свет огибает предметы . . . . . 186
Звезда-гигант . . . . . 187
Дифракционная решетка . . . . . 189
Эффект Доплера . . . . . 189
Вести из межзвездного пространства . . . . . 190
Кванты и электроны . . . . . 191
Невидимое становится видимым . . . . . 192
Главный оптический прибор . . . . . 193
Оптическое вооружение глаза . . . . . 194
Электронный микроскоп . . . . . 195
Телескоп . . . . . 196
Цветная фотография . . . . . 196
Роль оптики в развитии физики . . . . . 197
Электромагнитное поле — А. А. Коробко-Стефанов . . . . . 197
Магнетизм . . . . . 197
Электричество . . . . . 201
Электромагнетизм . . . . . 204
Магнитное поле . . . . . 206
Электрическое поле . . . . . 209
Законы электромагнитного поля . . . . . 210
Электроника . . . . . 214
Кванты электромагнитного поля . . . . . 217
Радио — И. А. Мипасян . . . . . 219
Великий помощник человека . . . . . 219
Первая радиограмма . . . . . 220
Электромагнитные волны . . . . . 221
Как распространяются радиоволны . . . . . 222
Схема радиосвязи . . . . . 224
Как настраиваются на волну . . . . . 224
Антенна и приемник . . . . . 227
Как усилить электрические колебания . . 227
Средство усиления — радиолампы . . . . . 227
Что дала вторая сетка . . . . . 231
Применение диода в радиотехнике . . . . . 232
Передача и прием радиопрограммы . . . . . 233
Современные радиолампы . . . . . 234
Вместо радиолампы — кристалл . . . . . 237
Электронный луч . . . . . 237
Квантово-механические радиоустройства . . 239
Разговор с планетами по радио — М. М. Андарало . . . . . 242
Для чего был нужен «разговор» с планетами? 242
Планетный радиолокатор . . . . . 243
«Голос» и «слух» локатора . . . . . 244
«Разговору» мешает Вселенная! . . . . . 244
Результаты, полученные при «разговорах» с планетами . . . . . 246
Полупроводники — Г. Б. Апфилов . . . 246
Проводники и изоляторы . . . . . 246
Электроны в полупроводнике . . . . . 247
«Дырки» . . . . . 248
Изготовление полупроводников . . . . . 249
Термисторы . . . . . 250
Машины чувствуют свет . . . . . 251
Нагреватели и светильники . . . . . 252
Запирающий слой . . . . . 252
Выпрямители . . . . . 253
Кристаллы и лампы . . . . . 254
Полупроводниковый триод . . . . . 254
Прочность, миниатюрность . . . . . 255
Переворот в радиотехнике . . . . . 256

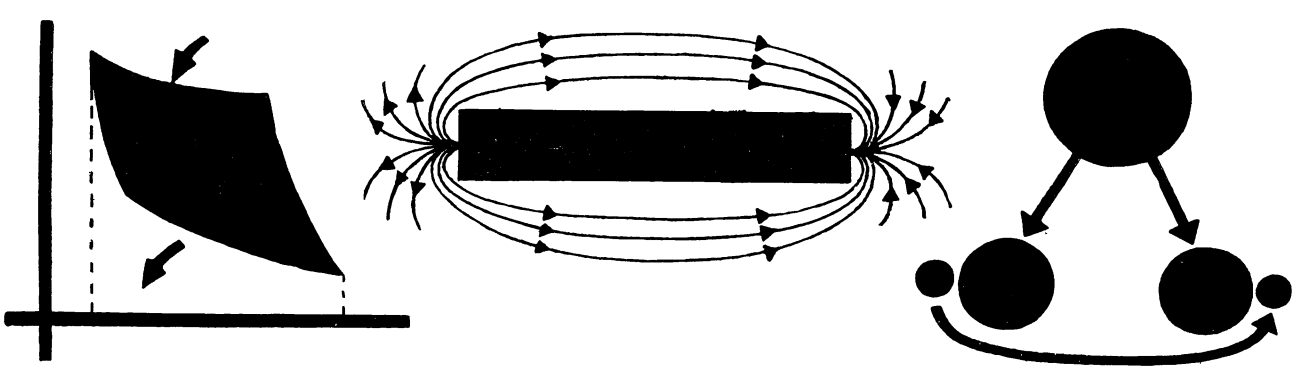


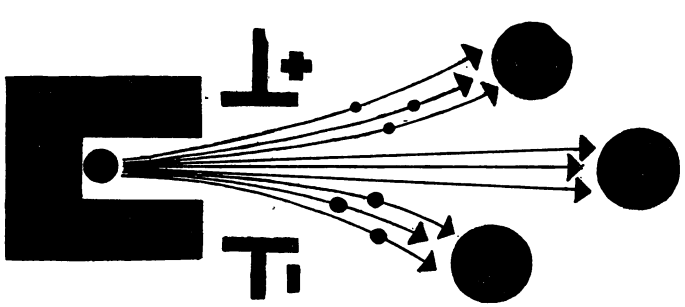


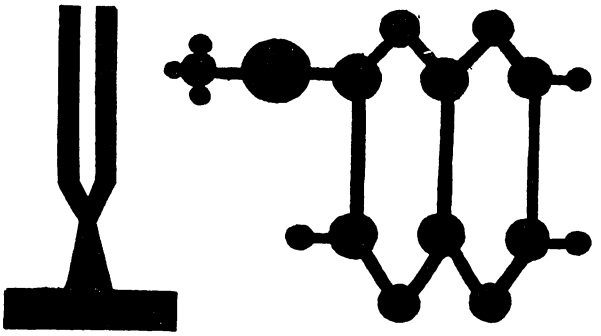

Электроэнергия из тепла . . . . . 257
Применение термоэлектрогенераторов . . . . 257
Новые холодильники . . . . . 258
Нагрев вместе с охлаждением . . . . . 258
Вентильный фотоэлемент . . . . . 259
Свет работает . . . . . 259
К солнечной энергетике . . . . . 260
Полупроводники и жизнь . . . . . 260


## Как и из чего вещество построено


Элементарные частицы — Д. А. Франк-Каменецкий . . . . . 262
Молекулы и атомы . . . . . 262
Внутриатомные частицы . . . . . 263
Космические лучи . . . . . 263
Ускорители . . . . . 264
Превращения элементарных частиц . . . . . 265
Множественное рождение частиц . . . . . 266
Частицы и волны . . . . . 267
Испускание света и рождение частиц . . . . 268
Тяжелые, средние и легкие частицы . . . . . 268
Частицы-волчки . . . . . 268
Частицы и античастицы . . . . . 269
«Отшельники» и «общественники» . . . . . 270
Неуловимая частица . . . . . 271
Квантование полей и пи-мезоны . . . . . 272
Рождение, жизнь и смерть химических элементов — Д. Н. Трифонов . . . . . 273
Урановые лучи . . . . . 274
Полшага до открытия . . . . . 274
Три вида лучей . . . . . 275
Металл=газ + газ . . . . . 275
Упорядоченный хаос . . . . . 276
Элементы первичные и вторичные . . . . . 278
Что такое радиоактивность? . . . . . 279
«Я вижу атом!» . . . . . 279
Азот превращается в кислород . . . . . 280
Нейтрон и новая модель атома . . . . . 282
Цепь великих открытий . . . . . 282
Искусственные элементы . . . . . 284
Земная жизнь искусственных элементов . . 284
Как объясняется радиоактивность современной наукой? . . . . . 285
Управляемый радиоактивный распад . . . 287
Сколько видов радиоактивных превращений существует? . . . . . 288
Гамма-лучи . . . . . 288
Коротко о нуклонах . . . . . 290
Маленькая интермедия . . . . . 290
Почему светят звезды? . . . . . 291
«Весь мир за пятнадцать минут» . . . . . 292
Ключ дает технеций . . . . . 293
От гелия до висмута . . . . . 293
Рождение и гибель сверхновых звезд . . . . 294
Атомный реактор — А. П. Сенченков . . 295
Жизнь нейтронов в реакторе . . . . . 297
Критическая масса реактора . . . . . 299
Регулировка мощности атомного реактора 299
Запаздывающие нейтроны . . . . . 299
Превращения элементов в атомном реакторе 300
Действие радиоактивных излучений на материалы атомного реактора . . . . . 301
Переработка атомного горючего . . . . . 301
Различные атомные реакторы . . . . . 301
Как видят невидимое (Приборы ядерной физики) — Б. И. Смагин . . . . . 302
Столовый прибор . . . . . 303
Туман помогает видеть . . . . . 303
Частица-фотограф . . . . . 305

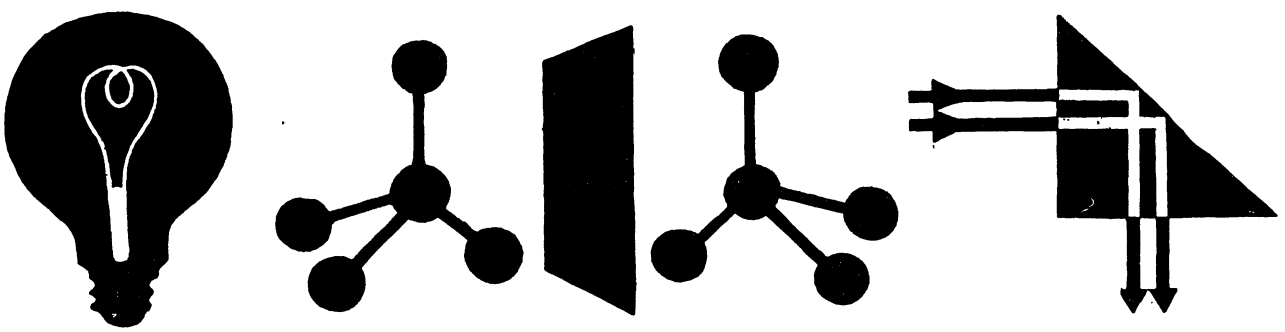


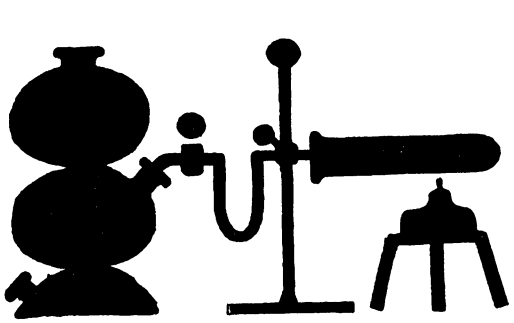
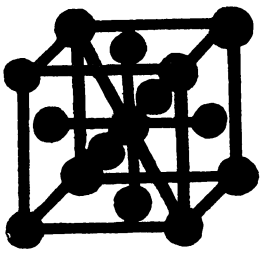
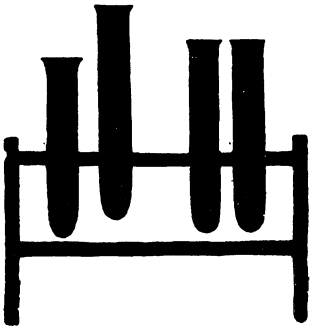



Счетчики Черенкова . . . . . 306
Пузырьковая камера . . . . . 306
Искровые счетчики . . . . . 307
Великий закон — И. В. Петрянов . . . . 307
Открытие Великого закона . . . . . 307
Как был открыт периодический закон . . . . 309
Тайна пустого места . . . . . 312
Великое предсказание . . . . . 312
Как оправдались предсказания Менделеева 314
Великое испытание периодического закона . . 315
Как радиоактивные элементы нашли свои места в таблице Менделеева . . . . . 316
В чем основа Великого закона? . . . . . 319
Новый смысл и значение атомного веса . . 321
Периодический закон — закон строения атома 322
Атом сам рассказал о своем устройстве . . 322
В атоме не может быть двух одинаковых электронов . . . . . 323
Как же все-таки может выглядеть атом? 323
Так на что же похож атом? . . . . . 325
Закон строения атома . . . . . 327
Формула атома . . . . . 327
Причина периодичности в свойствах химических элементов . . . . . 327
Строение атома и свойства вещества . . . . . 328
Строение атома и химия . . . . . 328
Почему водород стоит одновременно в двух клетках таблицы Менделеева? . . . . . 329
Самая удивительная группа таблицы Менделеева . . . . . 330
Благородные газы могут вступать в химические соединения . . . . . 330
Сколько редкоземельных элементов в одной клетке таблицы Менделеева? . . . . . 331
Как были предсказаны свойства элемента № 72 333
Последний период таблицы Менделеева . . 334
Элементы, созданные человеком, также подчиняются Великому закону . . . . . 334
Как были открыты трансурановые элементы 338
Заглянем в будущее . . . . . 342
Химия Вселенной . . . . . 344
Необычайные атомы — И. В. Петрянов 353
Позитроний . . . . . 353
Мезо-атомы . . . . . 354
Гипер-фрагменты . . . . . 354
Антиатомы . . . . . 355
У порога неведомого — И. В. Петрянов 355
На пути к открытию элемента 104 (Рассказ ученых, ведущих исследование)—Г. Н. Флеров, В. И. Кузнецов . . . . . 357
Семь состояний материи — Д. А. Франк-Каменецкий . . . . . 362
Порядок и беспорядок . . . . . 362
Что же такое стекло? . . . . . 364
Плазма — четвертое состояние вещества . . 365
Нейтронное состояние вещества . . . . . 368
Антивещество и эпиплазма . . . . . 369
Физический вакуум — седьмое состояние материи . . . . . 369
Твердое тело и его загадки — Б. Ф. Ормонт 370

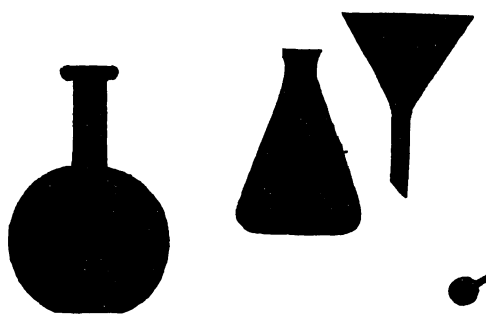
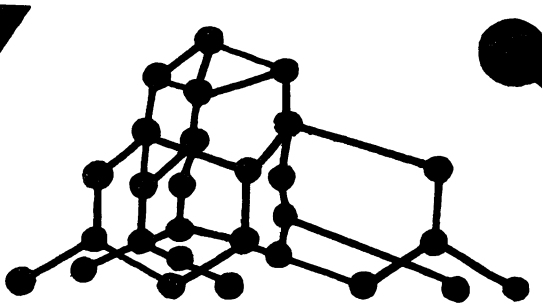
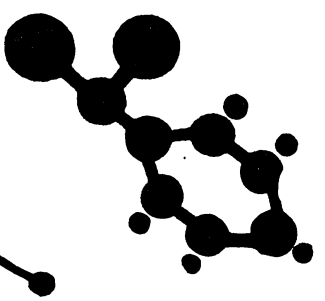

## Превращения вещества

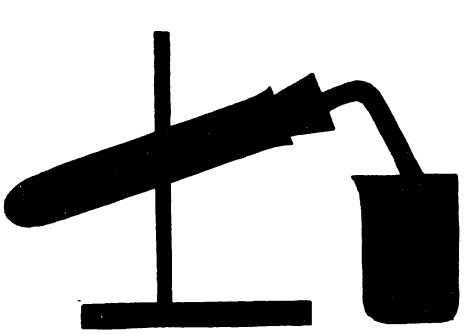

Химический анализ — Л. Г. Власов . . . . 378
Все цвета радуги . . . . . 379
Свет и цвет . . . . . 380
Паспорт химического соединения . . . . . 381
Весовой анализ . . . . . 381
Радиоактивность и химический анализ . . 382
Можно ли анализировать изотопы . . . . . 383

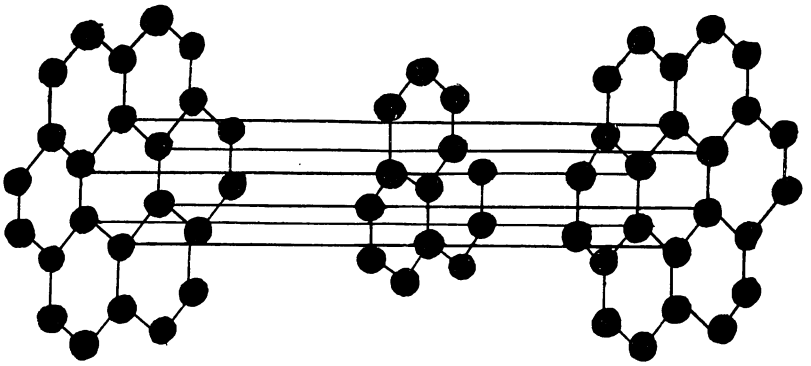




Есть ли предел анализу . . . . . 383
Удивительная судьба одного простого открытия (хроматография) — И. В. Петрянов, К. И. Сакодынский . . . . . 385
Что же открыл профессор Цвет? . . . . . 385
Что происходит в хроматографической колонне? 386
А если вещество бесцветно? . . . . . 387
Чем пахнет земляника . . . . . 387
Колонна длиной... в полкилометра . . . . . 388
Хроматография на листе бумаги . . . . . 388
Хроматография и биохимия . . . . . 389
Тонкослойная хроматография . . . . . 390
Ионообменная хроматография . . . . . 390
Хроматография и периодический закон . . . 391
Химия одного-единственного атома . . . . . 392
Хроматография сегодня . . . . . 394
...и завтра. . . . . 395
Химическая реакция — Д. Н. Трифонов 396
Большая задача электрохимии (топливные элементы)—А. Н. Фрумкин, В. С. Багоцкий . . . . . 405
Почему невыгодна тепловая машина . . . 405
Электрохимия и учение об электричестве 406
Электрохимия в современной науке и технике 407
Энергетика большая и малая . . . . . 407
Топливные элементы . . . . . 408
Водородно-кислородный элемент . . . . . 409
Высокотемпературные топливные элементы 410
Топливные элементы дают ток . . . . . 411
Замечательные явления на границе между телами — П. А. Ребиндер . . . . . 412
Молекулы-пограничники . . . . . 412
Поверхностная энергия . . . . . 413
Капли на поверхности. Смачивание. Форма жидких тел . . . . . 413
Адсорбция . . . . . 414
Как построены молекулы поверхностно-активных веществ . . . . . 415
Почему мыла моют . . . . . 417
Пены полезные и вредные . . . . . 419
От производства полимеров до книгопечатания 419
Путь к прочности — через разрушение 421
Неметаллы — В. Л. Василевский . . . 425
Что такое неметаллы . . . . . 426
От чего зависит активность неметалла . . . . 426
Почему неметаллы проявляют положительную и отрицательную валентность . . . . . 427
Семь+семь=восемь и восемь . . . . . 427
Правило электронных пар . . . . . 428
Агрегатное состояние веществ . . . . . 429
Место неметаллов в природе . . . . . 429
Кислородные соединения неметаллов . . . . 431
Водородные соединения неметаллов . . . . . 432
Парадоксы в семье неметаллов . . . . . 434
Свободные неметаллы в природе . . . . . 434
Химия жизни — это химия неметаллов . . . 438
Металлы — Ю. В. Ходаков, В. Л. Василевский . . . . . 439
Что такое металлы . . . . . 439
Когда металлы похожи друг на друга . . . 440
От чего зависит активность металла . . . . . 441
Как применение металлов связано с их свойствами . . . . . 442
Свойства сплавов и их состав . . . . . 442
Чем чугуны отличаются от сталей . . . . . 443
Какие бывают чугуны . . . . . 444
Как закаляется и отпускается сталь . . . . 445
Легированные стали . . . . . 445
В технику приходят новые металлы . . . . . 446
От алюминия к титану . . . . . 447

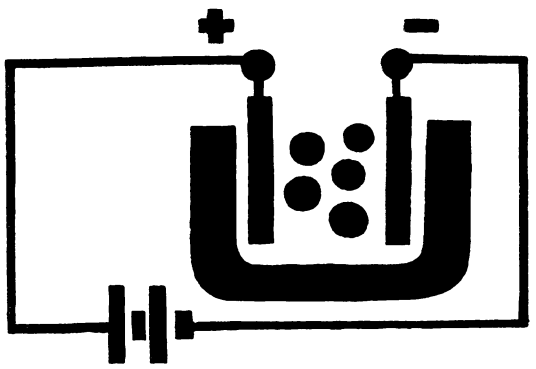


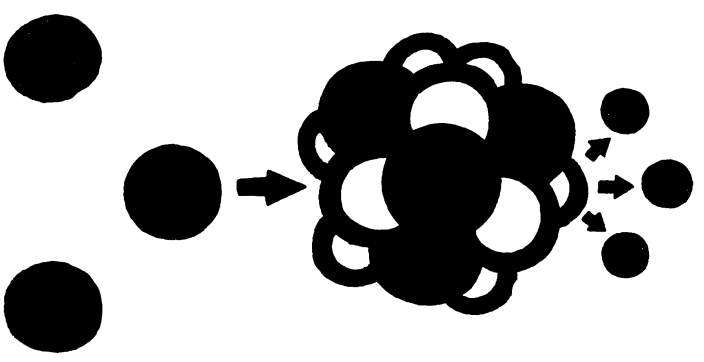



Старость и молодость металлов . . . . . 448
Кто следующий? . . . . . 448
Что такое «редкие» металлы . . . . . 449
Элемент полупроводниковой техники . . . . 450
Редкие земли — Д. Н. Трифонов . . . . 451
Органические вещества вокруг нас — М. И. Кабачник . . . . . 454
Сколько их? . . . . . 454
Почему их так много? . . . . . 455
Органические вещества в живой природе 457
Человек и органические вещества . . . . . 458
Создание теории строения органических веществ . . . . . 460
Краски всех цветов и оттенков . . . . . 461
Органические красители для фотографии и кино . . . . . 462
Лекарственные вещества . . . . . 463
Лес — источник органических веществ . . . 464
«Черное золото» — нефть . . . . . 464
Органические вещества в сельском хозяйстве . . . . . 467
Как химик строит нужную молекулу — Б. А. Казанский . . . . . 468
Полимеры — К. А. Гладков . . . . . 473
Для чего нужны полимеры . . . . . 473
Родословная больших молекул . . . . . 474
Первые искусственные пластмассы . . . . . 475
Как получаются молекулы-гиганты . . . . . 476
«Швейная фабрика» гигантских молекул 479
Поликонденсация . . . . . 479
Полимеризация . . . . . 481
Секрет прочности . . . . . 482
Стекло, кожа или резина? . . . . . 482
У истоков века полимеров . . . . . 484
И в огне не горит . . . . . 485
Полимеры будущего — В. А. Каргин . . . . 487
Полимеры — строительный материал . . . . 487
Полимеры в жизни людей . . . . . 488
Полимеры в медицине и биологии . . . . . 491
Химия жизни и здоровья — Ю. В. Ходаков 492
Особенности действия веществ на живой организм . . . . . 493
Молекулы против микробов . . . . . 493
От красок к лекарствам . . . . . 495
Усыпляющие лекарства . . . . . 496
Жизненные катализаторы . . . . . 497
На пути к искусственному созданию жизни 498
Химия и наследственность . . . . . 501
Медицина на молекулярном уровне . . . . . 503
Химия на службе войны и мира . . . . . 504
Химия пищи — Л. А. Цветков . . . . . 505
Беседа о самом необыкновенном в мире веществе — И. В. Петрянов, Е. А. Яковлева 511
Что такое вода? . . . . . 511
Свойства воды . . . . . 515


## Справочный отдел


Всему миру — одну меру (система единиц измерения)— В. И. Козлов . . . . . 524
Разберемся в размерах — Г. И. Гуревич 532
Биография химических элементов — Д. Н. Трифонов . . . . . 536
Важнейшие открытия в области физики и химии 543
Что читать по физике и химии — Б. В. Ляпунов . . . . . 548
Словарь-указатель — В. А. Коннов . . . . 556



# ФОТОГРАФИИ И ТАБЛИЦЫ НА ОТДЕЛЬНЫХ ЛИСТАХ


Исаак Ньютон (*портрет*) . . . . . 32—33
На обороте: Альберт Эйнштейн (*фотография*)
Автоматическая космическая станция около одной из планет (*художник Р. Ж. Авотин*) 40—41
На обороте: Мягкая посадка космической ракеты (*художник Р. Ж. Авотин*)
«Луна-9» на Океане бурь, 4 страницы . . . 48—49
Аэродинамическая труба (*художник Л. С. Вендров*) . . . . . 64—65
На обороте: Типы самолетных двигателей (*художник Л. С. Вендров*)
Фигуры высшего пилотажа (*художник Л. С. Вендров*) . . . . . 72—73
На обороте: Гиперзвуковые самолеты будущего (*художник Л. С. Вендров*)
Диаграмма слышимости звуков (*художник Л. С. Вендров*) . . . . . 112—113
На обороте: Устройство аппарата для ожижения гелия (*художник Б. А. Попов*)
Температурная шкала явлений в природе (*художник Б. А. Попов*) . . . . . 120—121
На обороте: Способы получения горячей плазмы (*художник Б. А. Попов*)
Спектр видимых лучей света (*художник Б. А. Малышев*) . . . . . 176—177
На обороте: Физические свойства световых лучей (*художник Б. А. Малышев*)
Схема цветного фотографирования (*художник Б. А. Малышев*) . . . . . 192—193
На обороте: Спектр электромагнитных волн и спектр радиоволн (*художник С. Н. Волков*)
Обозначения радиодеталей в схемах (*художник Б. А. Малышев*) . . . . . 232—233
На обороте: Микродетали и схема супергетеродинного приемника (*художник Б. А. Малышев*)
Следы элементарных частиц, зафиксированные в различных приборах (*фотографии*) 272—273
Радиоактивные семейства урана-238 и урана-235 (*художник С. Н. Волков*) . . . . 288—289
На обороте: Радиоактивные семейства тория-232 и нептуния-237 (*художник С. Н. Волков*)
Михаил Васильевич Ломоносов (*портрет, художник Р. Ж. Авотин*) . . . . . 312—313
На обороте: Дмитрий Иванович Менделеев (*фотография*)
Периодическая таблица элементов Менделеева (*художник Б. А. Попов*) 336—337
На обороте: Начало периодической таблицы атомных ядер. Атомная распространенность элементов в метеоритах и на Солнце. Периодический закон химии земной коры (*художник Б. А. Попов*)
Зависимость места, занимаемого элементом в периодической таблице, от числа электронов в атоме (*художник Б. А. Попов*) 348—349
На обороте: Ядерные реакции на Солнце (*художник Б. А. Попов*)
В лаборатории, где открывают элемент 104 (*фото А. П. Лидова*) . . . . . 360—361
К статье «Твердое тело и его загадки» (*художник Л. С. Вендров*) . . . . . 376—377
На обороте: Химическая реакция (*художник Ю. А. Макаренко*)
Различные виды хроматографии (*художник Ю. А. Макаренко*) . . . . . 392—393
На обороте: Хроматограммы некоторых веществ (*художник Г. В. Северденко*)
Электрохимические источники тока и топливный элемент (*художник Ю. А. Макаренко*) . . . . . 412—413
На обороте: Действие активного смачивателя и схема флотационной машины (*художник Л. С. Вендров*)
Распределение неметаллов в оболочках Земли (*художник К. В. Кудряшов*) . . . . 432—433
На обороте: Роль порфина в природе (*художник К. В. Кудряшов*)
Использование металлов в различные эпохи (*художник К. В. Кудряшов*) . . . . . 448—449
На обороте: Технологические свойства алюминия (*художник К. В. Кудряшов*)
Сергей Васильевич Лебедев (*фотография*) 472—473
На обороте: Игорь Васильевич Курчатов (*фотография*)
Процессы поликонденсации и полимеризации (*художник Ю. А. Макаренко*) . . . 480—481
На обороте: Структура полимеров (*художник Ю. А. Макаренко*)
Получение фторопласта (*художник Ю. А. Макаренко*) . . . . . 488—489
На обороте: Недалекое будущее полимеров (*художник Ю. В. Случевский*)
Структуры некоторых органических веществ (*художник Ю. А. Макаренко*) . . . . 496—497
На обороте: Структуры лекарственных веществ (*художник Г. Е. Валетов*)
Капля воды, упавшая в воду (*фотография И. В. Петрянова*) . . . . . 512—513
На обороте: Так льется вода (*фотография В. И. Козлова*)

НАЗЫВАЯ ФИЗИКУ МЕХАНИКОЙ МОЛЕКУЛ, ХИМИЮ — ФИЗИКОЙ АТОМОВ И ДАЛЕЕ БИОЛОГИЮ — ХИМИЕЙ БЕЛКОВ, Я ЖЕЛАЮ ЭТИМ ВЫРАЗИТЬ ПЕРЕХОД ОДНОЙ ИЗ ЭТИХ НАУК В ДРУГУЮ.

***Ф. ЭНГЕЛЬС***

ЭЛЕКТРОН ТАК ЖЕ *НЕИСЧЕРПАЕМ*, КАК И АТОМ, ПРИРОДА БЕСКОНЕЧНА, НО ОНА БЕСКОНЕЧНО *СУЩЕСТВУЕТ*, И ВОТ ЭТО-ТО ЕДИНСТВЕННО КАТЕГОРИЧЕСКОЕ, ЕДИНСТВЕННО БЕЗУСЛОВНОЕ ПРИЗНАНИЕ ЕЕ *СУЩЕСТВОВАНИЯ* ВНЕ СОЗНАНИЯ И ОЩУЩЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА И ОТЛИЧАЕТ ДИАЛЕКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛИЗМ ОТ РЕЛЯТИВИСТСКОГО АГНОСТИЦИЗМА И ИДЕАЛИЗМА.

***В. И. ЛЕНИН***

# БЕЗ ФИЗИКИ И ХИМИИ ВАМ НЕ ОБОЙТИСЬ

Здравствуйте, люди будущего!

Действительно, иначе вас не назовешь. Вы и есть люди будущего — сегодняшние школьники, студенты 70-х годов, специалисты 80-х, доктора и академики XXI в. Вам предстоит пользоваться всеми открытиями нашего поколения ученых, предстоит завершить все, что мы задумали, затеяли и не довели до конца. Именно вам вручим мы перечень наших надежд, планы наших открытий. Вы будете исполнителями и одновременно редакторами: кое-что вычеркнете как устаревшее, ненужное, ошибочное; остальное (главное!) осуществите. Едва ли можно предугадать, что именно вы откроете. Но к чему вы должны стремиться, какие задачи выполнять — это можно сказать и нужно.

Главная задача общеизвестна: сделать счастливыми человечество и самих себя, дать максимальное количество благ максимальному числу людей, практически — всем. Это и означает осуществить принцип коммунизма «каждому—по потребностям, от каждого—по способностям». Надо будет удовлетворить все материальные и все духовные потребности каждого человека.

Начнем разговор с материальных потребностей, прежде всего с первейшей — с пищи. На земном шаре сейчас далеко не все сытно едят; есть страны, которые нередко посещает голод, там часто и взрослые и дети умирают из-за недостатка пищи. Идеологи старого мира говорят, что тут ничего не поделаешь: планета, дескать, тесна, земли на всех не хватает. Так ли это? Цифры показывают, что в технически развитых странах, находящихся отнюдь не в самых лучших природных условиях, с каждого гектара снимают урожай в 4—5 раз выше, чем в слаборазвитых странах. Следовательно, дело не в количестве земли, а в техническом развитии.

Том, который вы держите в руках, посвящен физике и химии. Здесь химия предстанет перед вами как наука высоких урожаев, наука изобилия на столе. Химия—это удобрения: азот, фосфор, калий, микроэлементы... Химия — это охрана полей: инсектициды и фунгициды — яды против вредных животных; это гербициды — яды для сорняков, вредителей растительного происхождения. Химия — это чудесные вещества, управляющие ростом и развитием растений, ускоряющие созревание и увеличивающие рост плодов. Есть еще химия почвы — агрохимия, наука о создании наилучших условий для питания растений, для использования минеральных веществ, содержащихся в почве или добавленных в нее.

Для высоких урожаев чрезвычайно важна и селекция, т. е. создание новых, улучшенных сортов, более продуктивных (лучше усваивающих углекислый газ, воду, фосфор, калий, азот, полнее и быстрее превращающих их в белки, углеводы и другие пищевые вещества), засухоустойчивых, болезнеустойчивых, лучше поддающихся механизированной обработке и уборке и т. п.

Чем больше типов растений у селекционера, чем больше разнообразие форм, тем легче найти нужные сорта. Недавно выяснилось, что некоторые сильнодействующие химические вещества вызывают в семенах существенные наследственные изменения, при этом возникают новые наследственные линии с совершенно новыми свойствами,

дающие богатый выбор для селекционера. Так что и в эту, чисто биологическую, казалось бы, работу химия вносит свой вклад.

И если бы сегодня во всем мире люди сумели применить уже существующие передовые методы селекции, механизации и химизации, можно было бы увеличить мировой урожай по крайней мере раз в пять, даже не прибавляя ни одного гектара к существующим посевным площадям.

Но и это не предел. Теория позволяет уже сейчас предвидеть возможность дальнейшего увеличения урожайности. Все вы знаете, конечно, что растение синтезирует пищу для людей и корма для животных из углекислого газа и воды с помощью энергии солнечных лучей. Но, оказывается, растение не так уж идеально использует эту энергию. Растет оно не круглый год, так что зимой, поздней осенью и ранней весной солнечный свет пропадает зря. И в начале роста, когда листочки еще маленькие и редкие, большая часть лучей, минуя растения, бесполезно нагревает почву. Но даже и те лучи, которые попадают на листья, утилизируются не полностью. Инфракрасные лучи для фотосинтеза не пригодны. Отражается и часть видимых лучей, а часть проходит сквозь листья. Кроме того, значительная доля света тратится на испарение воды; таким способом растение предохраняет себя от жары и перегревания. В итоге растение использует только 0,5—1% падающего света на построение тканей.

Так что и тут таятся громадные резервы. Но вам надо будет немало поработать, чтобы сделать растения бережливее: заставить их повысить свой к.п.д. Известно, что микроскопическая водоросль хлорелла в мелких водоемах использует на построение органического вещества не 1, а 10—12% падающего света. И если вы добьетесь такой же производительности у растений суши, то превзойдете раз в десять урожайность передовых стран, а среднюю мировую урожайность раз в пятьдесят, сумеете прокормить на существующих посевных площадях не три миллиарда, а миллиардов сто пятьдесят людей, правда, на сегодняшем, т. е. неважном, уровне питания.

А быть может, вам удастся решить и совсем трудную задачу, почти фантастическую: так изменить природу растения, чтобы оно использовало энергию и инфракрасных лучей, сейчас пропадающих втуне.

Помимо физиологических, есть еще резервы географические. В настоящее время на земном шаре обрабатывается примерно 10% суши, всего лишь десятая часть! Но посевную площадь можно увеличить по крайней мере втрое, главным образом за счет влажных тропических лесов и сухих субтропических пустынь, полупустынь, степей. Джунгли требуют осушения, сухие степи — орошения. Тут нужны будут и каналы, и трубы, подводящие воду, и энергия — много дешевой энергии для машин, насосов, для поливки, строительства. И потребуются химические пленки, покрывающие и подстилающие, экономящие влагу, предохраняющие ее от испарения вверх и от просачивания вглубь. Нужно будет, кроме того, решить проблему опреснения соленой воды: опреснять ли ее физическим методом — кипятить с помощью атомной энергии, или опреснять химически — осаждать соли ионообменными смолами?

Физика и химия в равной степени важны для решения всех этих задач. Орошение — это энергетика и гидравлика. Теплотехника и оптика создадут благоприятный режим растению. Для механизации нужны механика, теплотехника, электричество. В общем, без химии и физики вам не обойтись, шагу не ступить!

Мы не упоминали еще о необъятных возможностях океана. Океаны в три раза обширнее суши, кроме того, они гораздо производительнее. Ведь водному растению не надо тратить энергию на испарение, предохраняя себя от высыхания; к. п. д. у него получается выше. Сейчас люди слабо используют океан. В нем вылавливают лишь незначительную часть рыбных богатств. Агротехника океана — дело будущего. Вы сами будете решать, как разводить рыбу, как вылавливать планктон и перерабатывать его, как возделывать подводные пашни, засеивать их и убирать,

как пасти подводные стада. Но без физики и химии не обойтись вам и на дне морском.

До сих пор речь шла о растительной пище. Чтобы сделать ее вкуснее и питательнее, вы будете использовать животных. Ведь коровы, свиньи, гуси, куры— все это маленькие заводики, превращающие зеленый корм, зерно или отбросы в мясо, жиры, молоко, яйца. Здесь есть свой расчет и свой к. п. д. Но у растений мы сравниваем поглощенную энергию и калорийность продуктов, а у животных — вес корма и привес тела. Так вот, и тут для повышения к.п.д. тоже важна химия. Чтобы усвоить пищу как следует, животное должно быть здоровым. И выгодным оказалось добавлять в рацион и коровам и цыплятам витамины и антибиотики. Кроме того, важны и химические добавки к пище. Белки животных тканей состоят из аминокислот. Недавно выяснилось, что аминокислоты не равноценны. Среди них есть и такие, которые организм животного сам для себя приготовить никак не может. Это — так называемые незаменимые аминокислоты. В кормах их мало, но организм животного использует их полностью. Все же остальные аминокислоты усваиваются только в строго определенной пропорции к незаменимым. Если каких-либо не незаменимых аминокислот не хватит, организм животного все же может создать их для себя из других не незаменимых кислот, а излишние аминокислоты будут из организма выброшены. Так, при постройке дома ведущий материал — кирпич, а известка, цемент, штукатурка, краска расходуются в зависимости от того, сколько пошло кирпича. Но если незаменимую аминокислоту изготовить химически (химически!) и добавить ее в корм, тогда и излишки прочих аминокислот тоже пойдут в дело— на построение тканей. Животное будет усваивать больше аминокислот, расти быстрее, к.п.д. его повысится.

Некоторые увлекающиеся ученые предполагают, что и вообще вся пища будущего будет химической. Быть может, химическая пища не всем придется по вкусу. Выше много говорилось о несовершенстве растений, но они несовершенны как аккумуляторы энергии. Зато как повара растения на высоте, они изготовляют из углекислого газа именно ту пищу, к которой мы привыкли. И тут техника оказалась бы в положении догоняющего подражателя, стремящегося и никогда не приближающегося к идеалу, дающего только суррогаты. Так что пускай нас кормит биология, а химия только подкармливает.

Итак, на суше и в океане с непременной помощью химии и физики вы получите вкусную и обильную пищу для сотен миллиардов людей. Но ведь человеку нужна не только еда. Нужны еще одежда, жилье, общественные и промышленные здания, орудия труда, машины, аппараты, технические и бытовые приборы, оборудование для транспорта и связи... Из какого материала вы будете все это изготовлять?

Вообще материал—наиболее неподатливая, наиболее косная, я бы сказал, часть производства. Недаром историки обозначают эпохи по главному материалу: век каменный, век бронзовый, железный век. С этой точки зрения ваш век будет веком химическим, эрой синтетических и химически переработанных материалов.

Одежда будущего — в основном химическая. Синтетическая кожа, синтетический мех, синтетические волокна — прочные, гибкие, непроницаемые, водоотталкивающие, ткани пористые, ткани несгораемые, даже нетканые «ткани», которые надо не сшивать, а склеивать.

Металл не уйдет из вашей жизни, но он изменит свои свойства. Теоретически уже доказано, что современные металлические изделия могли бы быть раз в десять прочнее. Уменьшают их прочность сверхмикроскопические неоднородности — ничтожные трещинки, сдвиги, неправильности, вакансии (пустоты, не занятые атомами). В лабораториях уже удалось получить тонкие нити — они называются «усами» — однородного металла, он действительно раз в десять прочнее

стали. Но от этих «усов» до монолитных брусков, до массового производства еще очень далекий путь. Вам предстоит пройти его, чтобы строить ажурные станки с осями-спицами, легчайшие автомашины и самолеты, переносные дома и кружевные мосты, почти прозрачные на вид.

У керамики и стекла прочность еще дальше от теоретической, чем у металла. Но недавно удалось повысить прочность стекла во много десятков раз путем специальной химической обработки его поверхности. Придавая стеклу мелкокристаллическое, как у металлов, строение, удалось значительно повысить и его жаростойкость.

И огнеупорные материалы понадобятся вам для высокотемпературных печей, для электротехники. Кое-что уже найдено: окись магния, окись тория, нитриды, бориды, карбиды с температурой плавления от 2500 до 3500°. Вероятно, вы захотите превзойти эти рекорды.

Для вычислительных машин, для автоматов, для радиосвязи и телевидения, а также для превращения тепла и световых лучей в электричество вам понадобятся полупроводники. Современные германий, кремний, селен не совсем хороши — они слишком чувствительны к температуре. И здесь уже есть находки, но вам придется поискать еще, чтобы ваши машины безотказно работали и в космосе, и в глубинах Земли, и в огненных печах, и около абсолютного нуля.

Нужны новые материалы и для квантовых генераторов: лазеров и мазеров — этих чудесных аппаратов, рождающих могучие лучи, режущие, плавящие, испаряющие, сверлящие и посылающие сигналы хоть на Луну, хоть на Марс, хоть к далеким звездам. В нынешних лазерах луч генерируется в кристалле искусственного рубина. Найдено немало и других веществ для генераторов: твердых — с неодимом, самарием, диспрозием; газовых — гелий-неоновых, неон-кислородных, аргоновых, криптоновых, цезиевых... Как видите, чуть не всю таблицу Менделеева приходится перебирать. Но ведь захочется же вам иметь в кармане этакий лучевой нож с батарейкой, чтобы в любую минуту срезать дерево, снести мешающую скалу или выточить из куска металла нужную детальку. Здесь также встретитесь вы с неизбежной проблемой к. п. д. В лазерах электрическая энергия превращается в свет; работать «лучевыми резцами» будет выгодно при небольших потерях. Если вы добьетесь большого к. п. д., то сумеете передавать энергию не по проводам, а лучами, скажем, из Якутии на Луну или на специальный отражательный спутник, а оттуда — в Москву. Видимо, в космическом вакууме такая передача будет возможна; но я не уверен, получится ли она в воздухе. Для поверхности Земли есть и другая очень заманчивая идея — передача с помощью сверхпроводников. Напоминаю вам, что во многих металлах и сплавах при температурах, близких к абсолютному нулю, совсем нет электрического сопротивления, ток идет без потерь. К сожалению, свойство это исчезает, когда температура повышается всего лишь на несколько градусов. И магнитное поле — а у всякого тока есть магнитное поле — тоже разрушает сверхпроводимость. Недавно найдены сплавы магнитоустойчивые и даже более или менее температуроустойчивые. Если бы вам удалось довести температуроустойчивость пусть не до комнатной температуры, а хотя бы до температуры жидкого кислорода, вы сумели бы передавать мощнейшие токи на любое расстояние и без потерь по самому тоненькому проводу.

Материалов в природе немало, казалось бы, хватит на все нужды. Но, к сожалению, они вас удовлетворить не смогут — выбор мал и качество не то. Придется вам создавать новые, и потому все-таки чаще всего вы будете иметь дело с искусственными, синтетическими материалами, и в особенности с полимерами. Полимеры будут у вас всякие: волокнистые, монолитные и со спутанными волокнами, как у минерала нефрита, полимеры тверже стали и прозрачнее стекла, огнеупорные, кислотоупорные, немагнитные и магнитные.

Говоря о пище, мы все время занимались расчетами: какова площадь пашен, да сколько поступает лучей, да сколько поглощается, все ли используется. Для материалов такие проблемы не стоят; материалы готовятся из атомов, которые встречаются повсеместно — в земной коре и в морской воде, а нередко и в воздухе. Однако нужно не только найти их, но еще и выделить, сконцентрировать, перетасовать или соединить, затратив на все это достаточное количество энергии. Проблема тут в энергии, и вы имеете право задать вопрос: где брать энергию для всех ваших будущих дел?

В наше время на Земле энергии добывается явно недостаточно: в среднем 0,1 *квт* на одного жителя планеты. Десятая эта доля никак не может избавить людей от самого грубого физического труда: от пахоты на волах, от копания земли лопатой, от переноски тяжестей на спине. Чтобы довести энерговооруженность технически отсталых стран хотя бы до уровня передовых, нужно увеличить ее раз в сорок. Возможен ли такой скачок? Мы знаем, что возможен ... в условиях социализма. Известно, что за годы Советской власти выработка энергии в нашей стране увеличилась в 200 раз.

Сейчас-то мировая энергетика опирается на нефть и уголь, в меньшей степени — на гидроэнергию. Но запасы угля и нефти ограниченны; далеко не все страны так богаты ими, как наша. В будущем, даже не в очень отдаленном, вам всерьез придется решать проблему источников энергии.

Самый щедрый из всех имеющихся у вас в запасе источников энергии — обыкновенная вода. Она состоит из водорода и кислорода, а в водороде на каждые 6700 обычных атомов приходится один атом тяжелого водорода — дейтерия. Один грамм дейтерия, превращаясь в гелий, может дать столько же энергии, сколько дает 10 *т* угля. Термоядерная энергия, добытая из воды небольшого пруда, равноценна всей современной добыче угля. Однако пока что этот заманчивый клад не дается в руки. Термоядерные реакции протекают при температуре в десятки и сотни миллионов градусов, любая печь превратится в атомный пар от такого жара. Однако в принципе можно предохранить стенки котла с помощью мощного магнитного поля. Техническое решение еще не найдено. Но, думаю, эта трудная задача рано или поздно будет решена.

Быть может, доступнее для нас «желтый уголь»: неиссякаемая энергия солнечных лучей. Подсчитано, что на каждый квадратный километр земной поверхности Солнце льет поток мощностью примерно в 100 000 *квт*. Цифра примерная, потому что ее очень заметно изменяют географическое положение местности, время года и дня, состояние атмосферы — ясное небо или облака. Превращать тепло и свет в электричество инженеры уже умеют; созданы термоэлементы и фотоэлементы с к. п. д., равным 7—10%. Если вы доведете к. п. д. процентов до тридцати—сорока и покроете фотоэлектрической пленкой, скажем, 5% — одну двадцатую долю суши,— и то вы получите энергии в десятки тысяч раз больше, чем производится сейчас во всем мире, в тысячу раз больше, чем нужно для полного избавления человека от тяжелого физического труда.

Третий перспективный источник энергии —подземное тепло. Недра нашей планеты нагреты до 1000° и выше. Мы живем на каменной облицовке громадной печи — планеты. Но как добыть из-под облицовки глубинный жар? Использовать гейзеры, теплые подземные воды, горячие пары? Температура их низковата для техники. Использовать вулканы, эти естественные отдушины, извергающие расплавленную лаву?

Но как управлять потоком лавы, как избежать ее затвердевания? Бурить 30-километровые скважины вплоть до глубин с температурой в 1000°, спускать туда термоэлементы? Но и эти глубины остынут со временем, вам придется перемещать приемники тепла или ставить их на автоматически роющие машины. Как видите, есть над чем поломать голову.

Конечно, получение энергии касается разделов физики: теплотехники, оптики, атомной физики, электротехники.

Уже можно смело мечтать о близких временах, когда потоки добытого из воды электричества зальют наши дома, поля и цехи. Получив в руки неисчерпаемые запасы энергии, вы, наверное, захотите управлять погодой, научитесь укрощать ураганы и штормы, направлять их бессмысленное буйство на полезную работу: пусть несут дожди в пустыню!

Вода и солнце дадут силу, а работать будут машины. Машины попроще возьмут на себя тяжелый труд, а сложные вычислительные машины—они уже появились—заменят вас на скучной, однообразной работе: в канцеляриях, при учете и расчетах, на заводах, при наблюдении за станками-автоматами и автоматическими линиями, на транспорте, в первую очередь на рельсах, потом на воде, под водой и в воздухе. Все тяжелое и скучное вы передадите машинам.

Только не думайте, что самим вам придется работать каких-нибудь три-четыре часа в сутки. Слово «коммунизм»—это не синоним безделья. Трудиться вам придется не меньше, чем нам, а может быть, даже и больше, но, конечно, продуктивнее. При коммунизме труд для всех членов общества станет первой жизненной потребностью, гармонически сливающейся с другими потребностями человека: стремлением к искусству и красоте, с тягой к путешествиям (наверное, и на другие планеты) и, самое главное, с потребностью творить.

Творческая жилка в человеке наиглавнейшая. Ничто не дает такого удовлетворения, подлинного, глубокого и чистого счастья, как процесс узнавания и созидания, как возможность видеть дело твоих рук и твоего ума. Творческая жилка есть у каждого человека, но частенько она подавляется первоочередными материальными заботами, а в капиталистических странах просто не все допускаются к творчеству, творчество там доступно только избранным, а угнетенные классы и даже угнетенные нации вообще не допускаются к образованию, не говоря уже о вершинах науки. Сегодня на земном шаре, в странах колониальных и полузависимых огромное количество неграмотных. Но в будущем, в обществе, разумно устроенном, при щедром изобилии пищи, материалов, энергии и машин, которое вы создадите, когда все материальные нужды будут легко обеспечиваться, первостепенными будут духовные потребности, и главная из них — потребность творить.

Творить можно в любой области: в искусстве, в производстве, в воспитании, в любой науке. Мне лично интереснее всего представляются творческие поиски в трех обширных и неиссякаемых направлениях: в изучении самого далекого, самого малого и самого сложного.

Самое далекое, конечно, в космосе. Вам предстоит изучать изъеденную кратерами Луну, Марс, Венеру, далекие холодные планеты с их промерзшими лунами, угловатые астероиды, кометы, Солнце, все околосолнечное пространство, а затем и бесчисленные звезды, одну дальше другой. Однако вы и так все рветесь в космос; едва ли нужно вам рассказывать, как заманчивы многообещающие космические поиски. Я только напомню вам, что космонавтика — это небесная механика и кинематика тел в физическом поле тяготения, это спектральный анализ, это радиосвязь и лазерная связь, это термодинамика и двигатели. Это—все разделы физики и все разделы химии.

Мир самого малого принадлежит физике почти целиком. Здесь вам предстоит разобраться в свойствах элементарных частичек — лептонов, мезонов, нуклонов, гиперонов, таинственных нейтрино, резонансов и особенно новых гипотетических частиц, быть может, наиболее первичных — так называемых кварков. Кто знает, сколько их еще

откроют, пока вы будете учиться? Вы будете иметь дело с ничтожными долями микрона и микросекунды, с исчезающе малыми величинами и исчезающе малыми мгновениями. Пылинки микромира — это кирпичики, из которых построены окружающие нас предметы. Их свойства так или иначе отражаются в свойствах атомов, химических молекул, а через них и в свойствах крупных тел. В ничтожно малом внутриатомном мире таятся великие силы, оттуда приходит термоядерная энергия, о величине которой вообразить трудно, и энергия аннигиляции, превосходящая термоядерную в десятки раз.

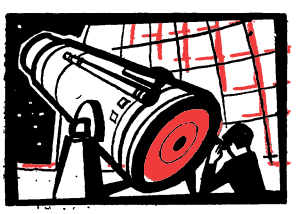
Мир самого сложного — это жизнь. Только недавно, лет 10—15 назад, ученые начали постепенно разбираться в химической стороне процесса жизнедеятельности; от поверхностного общего наблюдения перешли к химически точным анализам. И сразу же изменилось наше отношение к биологии. Прежде считали: техника давным-давно превзошла природу, природа—нечто отсталое, устаревшее, слабое, учиться там нечему. Оказалось, что это совсем не справедливо. Да, мы, люди, далеко превзошли природу мощностью, скоростью, температурой, размерами наших установок. Но природа безмерно превосходит любой завод необыкновенной слаженностью процессов, ювелирной точностью результатов, экономичностью и рациональностью.

Привычный пример — связывание атмосферного азота. На химических заводах для этого берут чистый азот, добытый из воздуха, соединяют его с чистым водородом, извлеченным из природного газа; процесс ведут при высокой температуре и высоком давлении. А клубеньковые бактерии, те, что сидят на корнях гороха и фасоли, умеют получать связанный азот из обычного неочищенного воздуха, чистым водородом не пользуются, не применяют ни высокое давление, ни повышенную температуру, ведут реакцию на своих «микрозаводах» — внутри клетки, где наряду с азотсвязующими молекулами существуют миллионы других, занятых своими делами. Изумительная целенаправленность и точность в чрезвычайно сложной обстановке!

Интересна и загадка зеленого листа, основного производителя пищи на нашей планете. О том, что зеленый лист добывает углеводы из углекислого газа, используя энергию солнечных лучей, известно давно. Но вот что еще обращает внимание: ведь кванты света сами по себе не способны разбить ни молекулу углекислого газа, ни молекулу воды. В клетках листа существуют для этого особые «микрозаводы» — так называемые хлоропласты, которые собирают лучи, накапливают их энергию и при обычной температуре решают проблему, как расщепить прочные молекулы углекислого газа и воды, получить крахмал и другие питательные вещества.

Перед вами стоит грандиозная задача: раскрыв тайну фотосинтеза, научиться самим проводить реакции, осуществляемые природой в химических комбинатах зеленых листов, в подземных лабораториях корней. Нужные продукты вы будете получать непосредственно из углекислого газа, из воды и из азота воздуха. И быть может, я даже уверен в этом, вы сумеете это делать лучше, экономичнее и масштабнее, чем зеленый лист. Ведь технике не нужно приспосабливаться к сложнейшей обстановке живого организма со всеми его запутанными связями.

В мышцах есть нечто сходное с зеленым листом. Там энергия, полученная при сжигании пищи в кислороде, тоже накапливается постепенно. Ее собирают молекулы адезинтрифосфорной кислоты. По приказу, полученному от нерва, они одним ударом растягивают или сжимают гибкие белки мускулов. К. п. д. здесь очень велик, процесс рационален, и вам, искателям будущего, надо будет задуматься, не стоит ли жесткие рычаги, валы и оси машин, привычные вам с детства, заменить для ряда машин мускулоподобными гибкими тяжами с химическими двигателями внутри них?



Но можно ли повторять живое в технике, спросите вы. Ведь есть же принципиальная разница между живым и неживым — мо-

лекулы живого организма как-то отличаются от простеньких молекул неживого мира. Вот тут-то и возникает вопрос: верно ли это? И недаром сейчас ученые особенно интересуются тем, что лежит на границе живого и неживого. Существуют ли живые молекулы? Существуют ли живые организмы, состоящие всего из нескольких молекул? Вы, конечно, слышали о вирусах. В настоящее время известно, что размерами вирус не отличается от крупнейших молекул. И в то же время вирус — это простейший организм, который живет, размножается. Нужно еще и еще работать, чтобы лучше понять тайны процессов, которые превращают сложную молекулу в организм с его удивительными экономичными, рациональными и точными устройствами.

Основа жизни — белок. Тайна строения белка начала открываться в последние годы. Выяснилось, что белки — это нити, состоящие из аминокислот всего лишь двух десятков типов.

Молекула белка как бы написана двадцатью литерами, но всего знаков в этом белковом слове десятки тысяч, целая брошюра нужна, чтобы записать буквами строение одного белка. И вот эту длинную, перевитую, местами склеенную нить организм штампует с удивительной быстротой и точностью, безошибочно вставляя нужные «буквы» — аминокислоты — в нужные места. Ведь если мы в белке поменяем местами хотя бы две аминокислоты, т. е. две буквы, то получим другой белок, с другими свойствами, иначе регулирующий жизненный процесс, и такая замена иногда даже приводит к неизлечимым заболеваниям, в частности к злокачественным опухолям, к психическим расстройствам...

Значит, как правило, организм не ошибается ни в одной букве. Мы, химики, можем только завидовать и руками разводить. Мы умеем тоже изготовлять «многобуквенные» нити — полимеры (нейлон, капрон и пр.), но наши полимеры все состоят из одинаковых букв, в лучшем случае написаны двумя буквами, а это гораздо легче.

Попробуйте перенять у природы ее типографское искусство, научитесь изготовлять нужные вам любые вещества любой сложности при нормальной температуре и в хаосе посторонних молекул.

Нам известно уже, что живое тело «печатает» белки по матрицам нуклеиновых кислот. Нуклеиновая кислота — это и есть та брошюра, где записано непомерно длинное слово — белок. Каждый организм получает от своих родителей полный набор этих брошюр, целую библиотечку. В них условными молекулярными знаками (всего лишь четырьмя) записан план построения организма, вся полученная от родителей наследственность.

И когда вы разберетесь в этой биологической грамоте, когда вы сумеете расставлять атомы по своему желанию и с той точностью, с какой делает это нуклеиновая кислота, тогда, возможно, вы даже наследственность сумеете регулировать, будете по своему плану изменять формы животных и растений, даже создавать совершенно новые.

Проектирование новых типов организмов, проектирование молекул, накопление квантов, выявление новых физических сил, поиски в самом далеком, самом малом и самом сложном, «умные» машины, добыча энергии, материалов и пищи — все это необходимо для всеобщего изобилия! Кажется, я перечислил достаточное количество проблем, чтобы каждый выбрал дорожку по своему вкусу, с удвоенным интересом взялся бы за изучение нужных ему разделов физики и химии. Если же кто-нибудь из читателей мечтает отыскать свои, принципиально новые, непредвиденные дорожки, могу обещать, что и непредвиденные пути тоже (и даже особенно) понадобятся.

Поясню на примере энергетики. Ваши деды и прадеды отапливали дома дровами, дрова сжигали в топках паровых котлов на фабриках и в паровозах. Но если бы мы вздумали сейчас питать нашу промышленность дровами, то свели бы все леса под корень задолго до конца XX в.

Дров не хватило, и мировая промышленность перешла на уголь, на нефть. Выше говорилось, однако, что для наших энергетических планов угля тоже хватит ненадолго. И указывались возможные повороты с угольной дороги на солнечную и термоядерную. Просторные эти пути позволяют увеличить энергопроизводство в десятки тысяч раз...

А что если вам понадобится увеличить их в миллион раз? Тогда даже широченные гелиошоссе и атомо-страды окажутся непригодными.

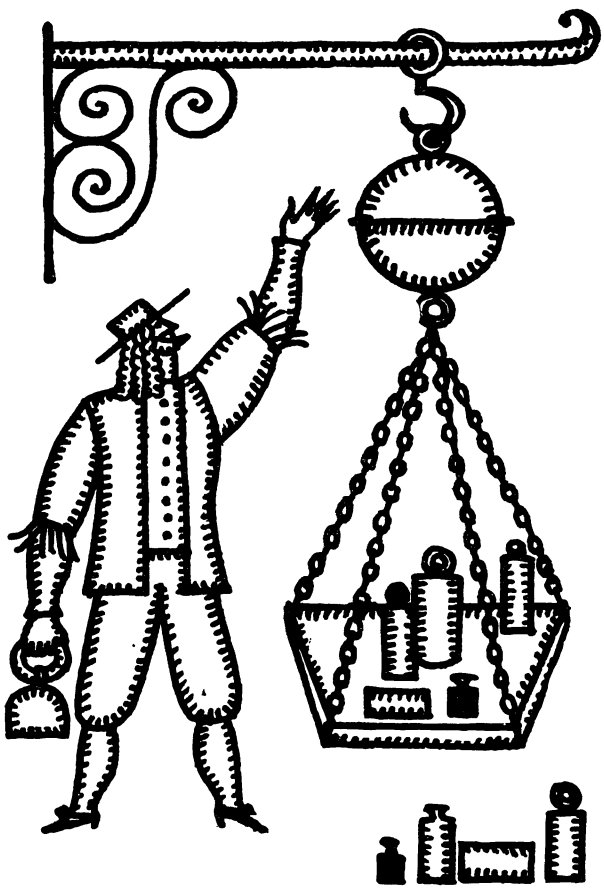
Дело в том, что человек становится сейчас, при вас станет окончательно, существом космического масштаба. Я говорю здесь не о путешествиях в космос, а о том, что человек будет способен изменять природу на всей своей планете. К энергетике все это имеет прямое отношение.

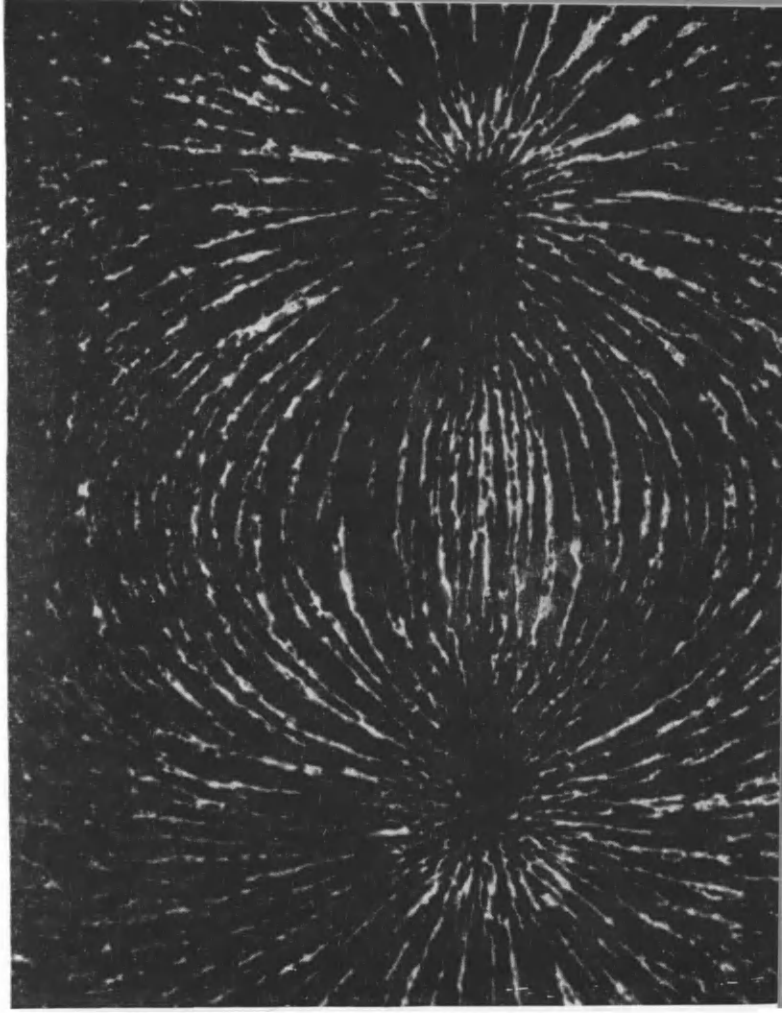
Запасы термоядерной энергии необъятны. В одном только озере Байкал хватит дейтерия, чтобы на целый год заменить Солнце. А сколько же Байкалов вмещается в океане! Но, оказывается, нельзя выпускать в атмосферу такое количество тепла безнаказанно. К солнечным лучам можно добавить 3—5, от силы 7%. Увеличив количество тепла на Земле процентов на десять, мы уже нарушим климат, перегреем нашу планету, засушим умеренные зоны, растопим полярные льды и переполним океаны. То же относится и к подземной энергии; это тепло дополнительное, его надо вносить с осторожностью. Значит, дойдя до некоторого предела, вам придется сворачивать с уже проторенных дорог энергетики: то ли отводить излишки тепла в космос, охлаждая атмосферу, как мы охлаждаем паровые котлы, отводя тепло в воздух, то ли выводить в космос энергоемкие производства, как сейчас вредные производства мы выводим из людных городов.

Видимо, у космоса будет в следующем тысячелетии сложная роль. До наших дней он в основном был астрономическим музеем: мы обращались к небу, чтобы изучать и учиться. Сейчас космос постепенно становится лабораторией физико-химико-биологической, там мы ставим и будем ставить опыты. В перспективе же космос превратится в «деловой двор» человечества, в пригород планеты-сада, именуемой Землей, в космос будут выведены производства опасные, вредные, пыльные, жаркие...

Конечно, это проблемы очень отдаленного будущего; их начнут решать к концу XXI в., а может, и позже... Но я назвал их, чтобы вы не думали, что все задачи уже решены вашими дедами и жизнь оставит вас без творчества.

В свое время вы решите и эти проблемы, кто-нибудь из вас сам напишет статью для будущего издания Детской энциклопедии о проблемах дальнейшего освоения космоса и закончит ее примерно так: «Нам трудно представить все поразительное, что вы, дети, сотворите на Земле и в космосе. В одном мы уверены твердо: все, что вы сотворите, будет сделано из материалов, предоставленных вам химией, с помощью сил, открытых для вас физикой». Так что без физики и химии вы не обойдетесь и тогда.





# ДВИЖЕНИЕ И ЭНЕРГИЯ

## ОСНОВА МЕХАНИКИ НАШИХ ДНЕЙ

### РАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Механика изучает движение тел и действие сил между ними. Главное свойство всякого движения — перемещение тела в пространстве. Наблюдая движущийся по шоссе автомобиль, мы прежде всего замечаем, что его положение относительно нашего «наблюдательного пункта» меняется. Если мы, начиная с некоторого момента, каждую секунду станем определять расстояние от автомобиля до нас, то получим представление о его движении. Действительно, при движении изменяются сразу две величины — расстояние и время. Расстояние относится к пространству, в котором происходит движение; время — независимая от движения величина, измеряемая часами. Чтобы описать движение тела, обычно рисуют график, на котором показано, как далеко ушло тело в каждый момент движения (рис. 1).

Одно и то же механическое тело, наблюдаемое из разных пунктов, совершает неодинаковые движения. Два человека, одновременно следящие за одним и тем же автомобилем и опре-

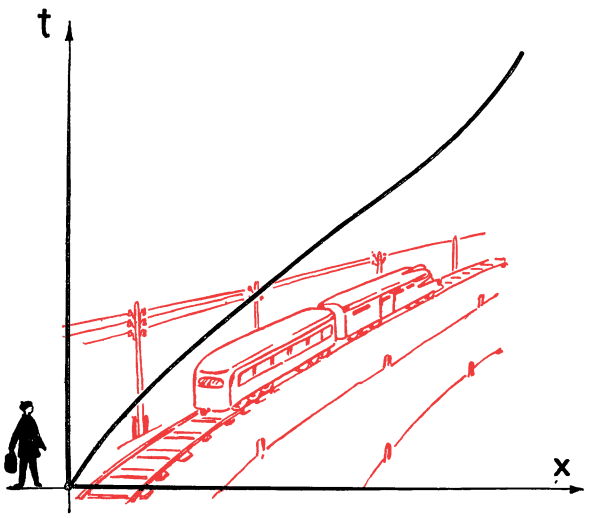



Рис. 1.

деляющие расстояние до него, могут утверждать, что от одного наблюдателя автомобиль убегает, а к другому приближается, расстояние от автомобиля до первого наблюдателя увеличивается, а до второго уменьшается. Так кто из них прав?

Или вот еще пример. Два автомобиля двигаются друг за другом с одинаковой скоростью; наблюдателю, сидящему в одном из них, другой автомобиль будет казаться неподвижным.

Из всего этого следует очень важный вывод: движение тел относительно разных наблюдателей различно, а само движение относительно. Поэтому, когда хотят точно описать движение какого-либо тела, заранее уславливаются, какой именно наблюдатель его видит.

На первый взгляд кажется, что такое условие только мешает изучать движение. Действительно, что можно сказать о движении тела, если относительно одного наблюдателя оно удаляется, к другому приближается, а для третьего и вовсе стоит на месте. Нельзя ли выбрать такой «наблюдательный пункт», относительно которого движение тела выглядело бы «настоящим», «абсолютным»?

Ответ на этот вопрос ученые искали с тех времен, когда Ньютон построил стройное здание так называемой классической механики. И эти поиски привели к тому, что в начале XX в. классическую механику пришлось дополнить новой, так называемой р е л я т и в и с т с к о й механикой, которую создал Эйнштейн.

До Эйнштейна классическая механика отвечала на этот вопрос так. Если тело двигается равномерно и прямолинейно, то на прямолинейном пути оно проходит за равные отрезки времени одно и то же расстояние. График такого движения изображен на рисунке 2. Каждая точка графика показывает, какое расстояние прошло тело от наблюдателя, находящегося в точке $O$ за время $t$. Этот путь выражается формулой:

$$x = vt, \qquad (1)$$

где $v$ — скорость тела. Можно построить график движения и для наблюдателя в точке $O_1$, находящейся на расстоянии $s$ от первого наблюдателя. Если обозначить расстояние тела от этого второго наблюдателя через $x_1$, то легко получим:

$$x_1 = x - s = vt - s. \qquad (2)$$

Таким образом, зная, как двигается тело относительно одного наблюдателя, можно определить, как оно будет двигаться относительно любого другого, находящегося на пути движения тела. В нашем случае, когда $vt < s$, тело будет ко второму наблюдателю приближаться и в момент $t_0 = \frac{s}{v}$ поравняется с ним, а при $vt > s$ начнет от него удаляться.

Что же будет, если второй наблюдатель сам двигается со скоростью $v_0$? Это значит, что расстояние $s$ между неподвижным и подвижным наблюдателями зависит от времени и выражается формулой:

$$s = v_0 t.$$

Подставив это выражение в формулу (2), мы получим

$$x_1 = x - v_0 t = (v - v_0)\, t. \qquad (3)$$

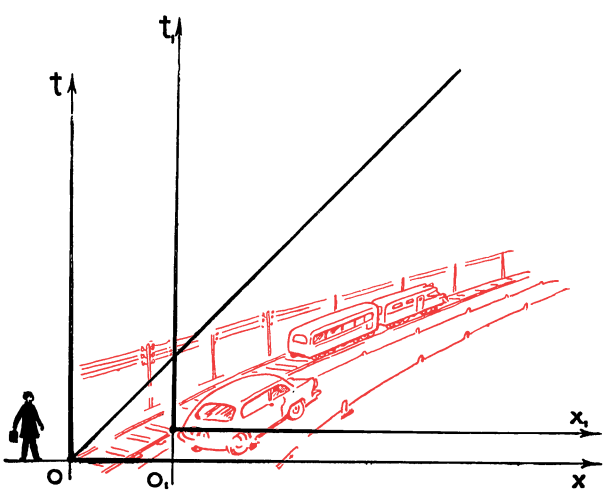



Рис. 2.

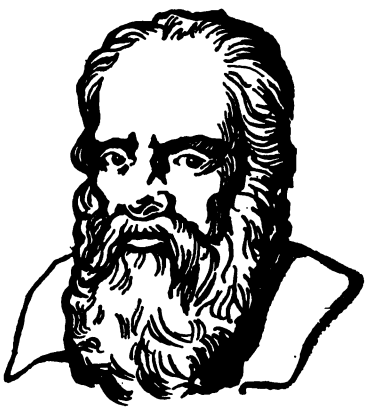
Из этой формулы видно, что движение тела относительно подвижного наблюдателя существенно зависит от соотношения скоростей. Если скорость наблюдателя меньше скорости тела, оно от него удаляется, если больше — приближается, и, наконец, если скорости наблюдателя и двигающегося тела равны, то они относительно друг друга неподвижны.

Таким образом, формулы (2) и (3) легко позволяют нам определить график движения относительно любых наблюдателей, подвижных или неподвижных, и это сразу снимает все неудобства при описании относительного движения.

Во всех этих рассуждениях мы предполагали, что у всех наблюдателей время течет одинаково, т. е. часы идут совершенно синхронно, и их относительное движение не влияет на их ход. Если к формуле (3) добавить утверждение, что

$$t = t_1, \qquad (4)$$

т. е. что время у обоих наблюдателей одно и то же, то мы получим формулы, которые называются *преобразованиями Галилея*. Галилео Галилей жил в XVII в. Он первым сформулировал в классической механике принцип относительности движения.



**Галилео Галилей.**

У преобразований Галилея более глубокий смысл, чем это кажется на первый взгляд. Классическая механика утверждает, что эти формулы справедливы не только на Земле, но и во всей Вселенной. Следовательно, нужно предположить, что пространство обладает свойством однородности, т. е. оно всюду одинаково. Если эти формулы справедливы при движении в любом направлении — вверх, вниз, направо, налево и т. д.,— то пространство должно обладать и свойством *изотропности*, т. е. его свойства во всех направлениях одинаковы. Образно говоря, для пространства не существует ни верха, ни низа, ни правого, ни левого направления. Именно этими качествами и наделяет пространство классическая механика.

Итак, изучая даже самое простое механическое явление — прямолинейное и равномерное движение тела,— мы должны признать очень важные гипотезы, чтобы не запутаться в описании движения относительно различных наблюдателей. Время универсально (едино для всех), пространство однородно и изотропно, и во всей Вселенной справедливы преобразования Галилея.

## НЕРАВНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ

Равномерное и прямолинейное движение редко встречается в природе. Если говорить точно, то на Земле его вовсе нет. И тем не менее первый закон Ньютона утверждает, что всякое тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного и равномерного движения, пока на это тело не подействует внешняя сила.

Правда, относительно покоящихся тел у нас не возникает никаких сомнений, потому что относительно Земли многие тела действительно находятся в состоянии покоя. Но зато они движутся вместе с Землей. А что касается равномерного прямолинейного движения, то дело обстоит сложнее. Трудно в условиях Земли поставить эксперимент, в котором на тело не действовали бы внешние силы. Даже если исключить все механические силы, то и тогда на любое материальное тело будет действовать притяжение Земли. Значит, на Земле нет тела, на которое не действовали бы силы. Тогда как же Ньютон мог сформулировать свой закон?

Во-первых, он заметил: чем слабее сила, действующая на тело, тем меньше изменяется его скорость. А во-вторых, на Земле все-таки существуют движения, очень близкие к равномерному и прямолинейному. Например, равномерное и прямолинейное движение парохода по гладкой поверхности озера.

Правда, на пароходе работают двигатели и на него действует тяговая сила винтов. Но эта сила всего лишь преодолевает трение пароходного корпуса о воду. Во время равномерного движения трение и тяга двигателей полностью уравновешиваются и пароход движется по инерции, равномерно и прямолинейно, в соответствии с первым законом Ньютона. То же можно сказать и о прямолинейном движении автомобиля, поезда, самолета. Главное

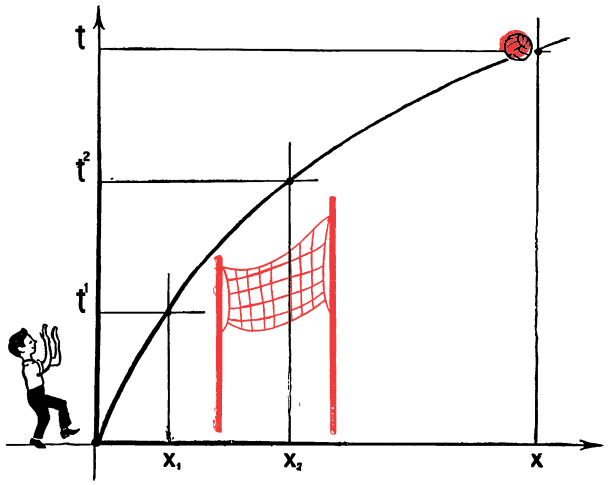



Рис. 3.

назначение двигателей у всех видов транспортных машин — сообщить такую скорость, при которой была бы скомпенсирована сила трения. Как только этот момент наступает, тело начинает двигаться равномерно.

Неравномерное движение изображается графиком, примерно таким, какой дан на рисунке 3. На нем видно, что в равные промежутки времени тело проходит неравные расстояния. В связи с этим понятие скорости для неравномерного движения несколько иное, чем для равномерного. Например, можно ввести так называемую среднюю скорость за время движения. Она будет равна, как и в случае равномерного движения:

$$v_{ср} = \frac{x}{t}.$$

Можно ввести среднюю скорость за некоторый промежуток времени, она уже не будет равна средней скорости за все время движения. И наконец, в механике для неравномерного движения вводится **мгновенное значение скорости.** Она получается из средней скорости, если промежуток времени сокращать до нуля:

$$v_{мгн} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \text{ при } t_2 \to t_1$$

(стрелка $\to$ означает «стремится к...»).

Простейший пример неравномерного движения — равномерно ускоренное движение. При этом скорость тела в равные промежутки времени увеличивается на одну и ту же величину. Прирост величины скорости за одну секунду называется ускорением. При равноускоренном движении легко для любого момента времени вычислить мгновенную скорость: $v = at$.

Зная ускорение $a$, можно определить путь, который проделает тело за время $t$:

$$x = \frac{at^2}{2}. \qquad (5)$$

На примере равномерно ускоренного движения можно установить, как будет выглядеть любое неравномерное движение тела относительно подвижных и неподвижных наблюдателей.

Путь, пройденный телом при равномерно ускоренном движении, выражается формулой (5). Эта формула справедлива для неподвижного наблюдателя, который в момент времени $t=0$ находится рядом с движущимся телом.

Найдем, как выглядит равномерно ускоренное движение относительно наблюдателя, который движется по тому же пути, что и равномерно ускоренное тело, но с постоянной скоростью $v_0$. Для этого нужно формулу пути ускоренного тела, как говорят, «подвергнуть преобразованиям Галилея». В формуле (3) заменим $x$ на $\frac{at^2}{2}$, тогда путь относительно подвижного наблюдателя выразится так:

$$x_1 = \frac{at^2}{2} - v_0 t = \frac{at_1^2}{2} - v_0 t_1.$$

Мы заменили $t$ на $t_1$, чтобы подчеркнуть, что теперь формула относится к подвижному наблюдателю. Но не забывайте, что $t_1 = t$.

Теперь легко вычислить мгновенную скорость и мгновенное ускорение тела относительно подвижного наблюдателя. Для этого по графику 3 определим расстояние, пройденное телом к моментам $t_1^1$ и $t_2^1$, и разделим этот путь на интервал $t_2^1 - t_1^1$:

$$v_1 = \frac{a\left(t_2^1 + t_1^1\right)}{2} - v_0.$$

Мгновенное значение скорости получится, если этот интервал уменьшать до нуля. Тогда $t_1^1 = t_2^1$. И, значит, мгновенное значение скорости тела относительно подвижного наблюдателя будет: $v = at_1 - v_0$, т. е. от мгновенной скорости тела относительно неподвижного наблюдателя нужно лишь отнять (или прибавить к нему) скорость наблюдателя.

Чтобы определить ускорение относительно подвижного наблюдателя, воспользуемся прежним приемом и вычислим мгновенное значение ускорения $a$, оно равняется приросту скорости тела за единицу времени:

$$a_1^{\pm} = a\frac{t_2^1 - t_1^1}{t_2^1 - t_1^1} = a.$$

Получается интересный результат: ускорение тела относительно равномерно двигающегося наблюдателя в точности равно ускорению относительно неподвижного наблюдателя. Значит, все неподвижные наблюдатели и все наблюдатели, двигающиеся прямолинейно и равномерно относительно друг друга, изучая равномерно ускоренное движение, будут определять различные мгновенные скорости тела, но одно и то же ускорение. Если скорость тела в классической механике относительна, то ускорение абсолютно, т. е. не зависит от равномерного движения наблюдателя.

Это очень важный вывод, особенно если вспомнить, что, согласно второму закону Ньютона, сила, действующая на тело, пропорциональна массе тела, умноженной на ускорение. Так как масса тела не зависит от наблюдателя, значит, сила в классической механике величина абсолютная, она не зависит от равномерного и прямолинейного движения наблюдателя.

В этом смысле все покоящиеся относительно тела наблюдатели, а также все наблюдатели, двигающиеся равномерно и прямолинейно, равноценны. Изучая движение тел и определяя действующие на них силы, все эти наблюдатели получат один и тот же результат.

Мы предполагаем, что наблюдатели снабжены хорошими часами и измерительными приборами. Изучая движение тел, они измеряют расстояния до них, а при расчетах пользуются формулами механики. Поэтому вместо того, чтобы говорить «наблюдатель», часто применяют термин «система отсчета». Сами системы отсчета принято называть инерциальными, потому что прямолинейное и равномерное движение тел возможно лишь по инерции.

Полученный вывод можно сформулировать так: ускорения и силы, действующие на тела относительно инерциальных систем отсчета, имеют одно и то же значение.

## ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ И СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

Мы очень подробно остановились на изучении движения тел относительно различных наблюдателей потому, что это имеет фундаментальное значение не только для механики, но и для всей физики. Физика изучает различные явления природы и стремится подметить законы, управляющие этими явлениями. Например, утверждение Ньютона, что сила равна массе, умноженной на ускорение, — это закон природы. Закон природы потому и называется законом, что он действует всегда независимо от того, кто и как наблюдает его проявления. Физики условились называть «настоящими» законами природы только такие, которые не зависят от состояния и движения системы отсчета. В этом смысле утверждение «сила равна массе, умноженной на ускорение» есть закон природы, справедливый для всех инерциальных систем отсчета.

Поясним это на примерах. При падении на землю любого тела проявляется закон сохранения энергии. Приращение кинетической энергии в любой момент равно убыли потенциальной энергии. Для наблюдателя, стоящего на земной поверхности, в течение всего времени справедливо соотношение:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = E,$$

где $m$ — масса тела, $v$ — его мгновенная скорость относительно земного наблюдателя, $g$ — коэффициент ускорения, $h$ — расстояние от Земли, $E$ — постоянная энергия падающего тела.

Для наблюдателя, двигающегося равномерно вверх, формулу этого закона следует преобразовать, как это показано в формулах (3) и (4):

$$\frac{(mv_1 - v_0)^2}{2} + mgh = E.$$

Здесь $v_0$ — постоянная скорость движения наблюдателя, а $v_1$ — мгновенная скорость тела относительно движущегося наблюдателя.

Это уравнение подтверждает закон сохранения энергии, он, как говорят физики, инвариантен, т. е. остается неизменным при преобразованиях Галилея. Таким образом, **закон сохранения энергии** — «настоящий» закон природы, не зависящий от наблюдательного пункта.

Рассмотрим также другой закон природы — закон сохранения количества движения, или, как он иначе называется, **закон импульса** (рис. 4). Представим себе, что из лодки, дви-

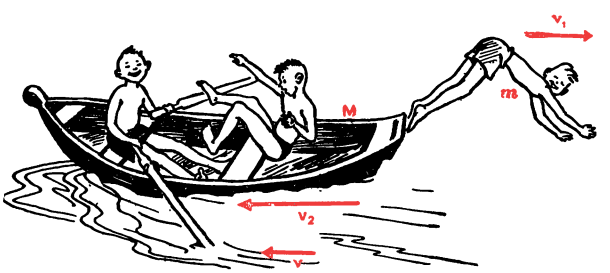



**Рис. 4. По закону о сохранении движения** $(m+M)v = mv_1 + Mv_2$.

гающейся со скоростью течения реки $v$, прыгает в воду пловец с начальной скоростью $v_1$. Масса лодки и масса пловца соответственно равны $m$ и $M$. Тогда относительно неподвижного наблюдателя закон сохранения количества движения можно записать формулой:

$$(m + M)v = mv_1 + Mv_2.$$

(до прыжка) (после прыжка)

К этой лодке приближается другая — с наблюдателем. Если скорость лодки относительно течения реки будет $v_0$, наблюдатель запишет закон сохранения импульса в таком виде:

$$(m + M)v_1 = mv_1^1 + Mv_2^1.$$

Скорости $v_1$, $v_1^1$, $v_2^1$ для подвижного наблюдателя получаются после простых преобразований по формулам Галилея. Итак, для подвижного наблюдателя закон сохранения импульса имеет такой же вид, как и для неподвижного.

Такой же способ применяется во всех случаях, когда надо определить, возможно ли назвать законом природы экспериментально обнаруженную или выведенную теоретически закономерность. Для этого нужно написать соотношение между физическими величинами для неподвижного наблюдателя и применить к нему преобразования Галилея. Если соотношение не изменится, значит, закономерность — закон природы. Если соотношение физических величин при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой изменится радикальным образом, то эта закономерность представляет собой лишь частную зависимость, свою для каждой инерциальной системы отсчета.

## СИЛА

Понятие силы имеет очень важное значение для всей физики, потому что именно сила — причина, которая изменяет движения физических тел. Хотя мы очень часто чувствуем на себе действие различных сил, определить, что такое сила, довольно сложно. Механика изучает различные силы главным образом по их действию на тела. Если мы замечаем, что какое-либо тело изменило скорость или направление движения, то мы говорим, что на него подействовала сила. Поэтому наиболее употребительно определение: сила — это действие одного тела на другое. Но в этой формулировке очень мало положительного содержания, так как она не вскрывает механизм действия.

То, что у сил различная природа, видно хотя бы из следующих примеров. Мускульным усилием мы сдвигаем нагруженную тележку, и она, достигнув определенной скорости, катится равномерно. Здесь проявляется **действие одного тела** (наших рук) **на другое** (тележка). **Сила трения** постепенно останавливает железнодорожный вагон, который двигается по инерции.

Но вот пример другой силы: камень падает на землю с равномерным ускорением. На него действует **сила тяготения**. Эта сила несколько необычна, потому что здесь одно тело (Земля) действует на другое (камень) на расстоянии без какого-либо промежуточного контакта. Силы всемирного тяготения распространяются на всю Вселенную и действуют между всеми материальными телами, как бы далеко они друг от друга ни находились. **Силы электростатического и магнитного притяжений** похожи на силу тяготения потому, что эти силы тоже действуют на расстоянии.

Существует и третий вид силы, она называется силой инерции. Ее мы особенно хорошо чувствуем, когда автобус сильно тормозит или делает резкий поворот.

Мы уже говорили, что силы, действующие между различными телами, одинаковы относительно инерциальных систем отсчета. Здесь уместно сказать несколько слов о неинерциальных системах отсчета. Можно себе представить наблюдателя, который двигается не равномерно, а с ускорением. Тогда весь физический мир будет ему казаться совершенно иным, и он обнаружит, что на тела действуют силы, которых фактически нет.

Пусть, например, некто ведет свои наблюдения сквозь стеклянные стенки кабины лифта, которая свободно падает в глубокий колодец. При таком падении наблюдатель будет в состоянии невесомости; следовательно, он может считать, что сила тяжести на него не действует! Измеряя скорость движения различных тел относительно себя (например, скорость движения стены шахты, в которой происходит падение), он установит, что стена двигается равномерно ускоренно и, значит, по закону Ньютона на нее должна действовать сила.

Но здравый смысл подсказывает парашютисту в затяжном прыжке, что Земля все быстрее и быстрее приближается к нему не потому, что ей сообщает ускорение какая-то сила. Он знает, что закон Ньютона здесь следует понимать так: именно он, парашютист, падает с равномерным ускорением.

В земных условиях сравнительно просто определить, к какому телу приложена сила. Но представим себя в космическом пространстве. Мы наблюдаем за какой-нибудь далекой звездой и обнаруживаем, что она ускоренно движется к нам. Предположим, что нам известна ее масса. Тогда мы определим действующую на нее силу и на основании этого можем сделать несколько различных предположений:

1. Звезда неподвижна, никакая сила на нее не действует, а мы падаем на ее поверхность.

2. Мы двигаемся равномерно и прямолинейно, а звезда — это гигантский космический корабль, набирающий скорость.

3. И мы и звезда двигаемся под действием разных сил. Может быть, звезду притягивает к себе какое-то огромное, невидимое материальное тело.

Решить, какое из предположений правильно, очень трудно, пока не будут проведены дополнительные исследования. Эти трудности возникают потому, что в неинерциальных системах отсчета, кроме «обычных» сил, появляются еще «фиктивные» силы как внутри системы отсчета, так и вне ее. Пример действия фиктивной силы— ускоренное движение стен шахты, наблюдаемое из свободно падающей кабины лифта. Фиктивные силы мы определяем только на основании измерений. Однако внутри неинерциальной системы обычные, нефиктивные силы не менее реальны, чем и вне этой системы.

Вспомним, например, **силу перегрузки**, которую испытывает космонавт на активном участке траектории космического корабля. Двигаясь ускоренно против силы тяжести, можно создать перегрузку в несколько раз большую, чем сила тяжести на поверхности Земли. Недаром перегрузки обычно измеряются в единицах $g$ ($g$ — ускорение силы тяжести на поверхности Земли). Если космонавт испытывает перегрузку в $5g$, то это значит, что его вес становится в пять раз больше, чем на Земле.

Эти силы вызваны инерцией: тело, в соответствии с первым законом Ньютона, стремится сохранить состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения. Изменение этого состояния приводит, по закону действия и противодействия, к «сопротивлению» тела. Вот почему иногда **закон действия и противодействия** записывают в форме:

$$F - ma = 0,$$

где $F$ — действующая сила, а $ma$ — сила инерции. Сила инерции пропорциональна массе тела.

В механике, по существу, приходится иметь дело с двумя видами массы. Чтобы в этом разобраться, запишем **второй закон Ньютона** и **закон всемирного тяготения:**

$$F = ma,$$

$$f = \gamma \frac{mM}{R^2}.$$

Вторая формула выражает силу взаимного притяжения между массами $m$ и $M$, $R$ — расстояние между телами, а $\gamma$ — так называемая гравитационная постоянная. В одном случае тело находится под действием силы $F$, а во втором — под действием силы притяжения $f$. Должны ли мы в обоих случаях под массой $m$ понимать одну и ту же величину?

Считается, что обе массы одинаковы, хотя в классической механике это ниоткуда не следует и никак не доказывается. Действительно, во втором законе Ньютона масса $m$ — это мера «сопротивляемости» тела действию силы или **мера инерции**. Чем больше масса, тем больше она сопротивляется воздействию силы и поэтому при одном и том же значении действующей силы приобретает меньшее ускорение.

В законе же всемирного тяготения масса $m$ участвует в некоем «таинственном» взаимодействии с другой массой, отделенной от нее расстоянием $R$. Здесь масса «активна» в ее действии на другую массу, в отличие от «пассивной», сопротивляющейся массы инерции. Эту активную массу называют гравитационной.

Она «имеет право» быть отличимой от инерционной массы. Эйнштейн рассматривал всемирное тяготение не как свойство, присущее материальным телам, а как свойство пространства вблизи материальных тел. Он исходил из того, что гравитационное притяжение не зависит от внутренней структуры вещества.

А в природе существуют силы, для которых внутренняя структура тел не безразлична. Магнит, например, притягивает далеко не каждое тело. Диамагнитные вещества магнитное поле даже отталкивает. Причина этого в глубоких особенностях атомной и молекулярной структуры.

Гравитационное же притяжение масс не зависит от их химической и физической природы. Кроме того, доказано и опытным путем, и теоретически, что скорость падения различных тел на Землю не зависит от их массы. В вакууме пушинка и килограммовая гиря будут падать с любой высоты с одинаковой скоростью.

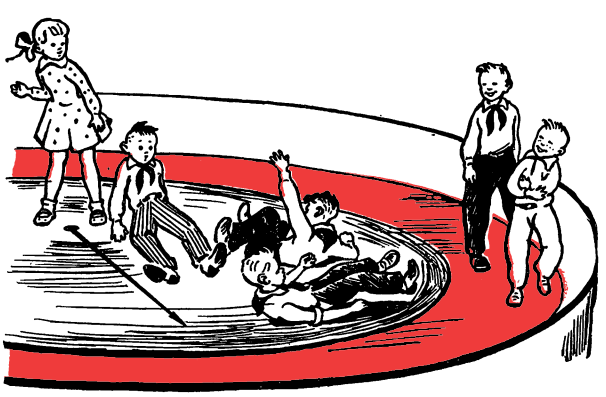
Утверждая справедливость преобразования Галилея (см. стр. 26), мы выдвинули гипотезу

об изотропном и однородном пространстве. Такая гипотеза верна, если предположить, что свойства пространства не зависят от присутствия в нем материальных тел. Эйнштейн, исходя из тождественности инерционной и гравитационной масс, высказал предположение, что пространство изменяет свои свойства вблизи материальных тел, что оно перестает быть однородным и изотропным, а траектории движения других тел в таком пространстве искривляются. Наблюдатель воспринимает такое изменение пространственных свойств как действие закона всемирного тяготения. Предположение Эйнштейна впоследствии было неоднократно подтверждено на опытах.

Чтобы закончить рассказ о силах, мы рассмотрим один интересный класс сил, которые действуют не в направлении движения тел.

Скорость и ускорение тела и расстояние до него от исходной точки отсчета — все это величины векторные, т. е. у них есть направление. Если тело свободно передвигается в пространстве, направление его движения совпадает с направлением действия силы.

Однако это происходит иначе, если движение тела «связанно». Например, движение по круговой траектории обладает замечательным свойством: направление скорости движения и направление действия **центростремительной силы** взаимно перпендикулярны. Планеты, двигаясь по эллиптическим орбитам вокруг Солнца, испытывают действие центростремительных сил, которые направлены под углом к вектору их движения. Центростремительная сила уравновешивается силой притяжения к Солнцу, так что результирующая сила равна нулю и планеты движутся по инерции.



«Чертово колесо».

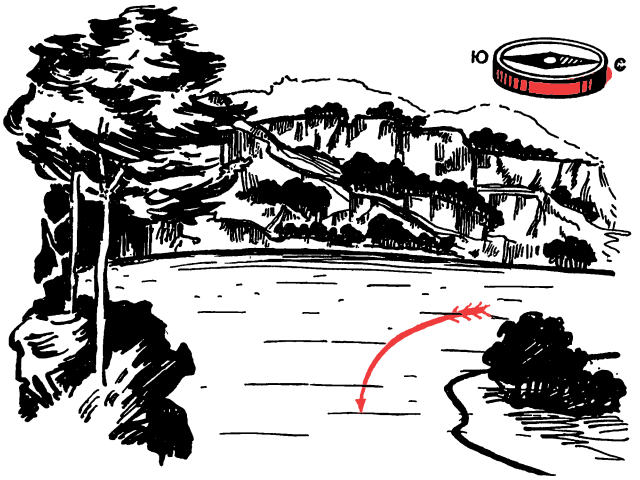



Рис. 5. Вращение Земли заставляет воду подмывать правый берег у рек, текущих с севера на юг и с юга на север.

Может показаться странным, что мы говорим об инерции на криволинейной орбите, ведь инерциальное движение, согласно учению Ньютона, возможно лишь по прямым линиям. Именно здесь-то и сказывается выдвинутое Эйнштейном положение о том, что прямые, по которым могут двигаться тела по инерции, становятся вблизи материальных тел кривыми. Опыты показали, что вблизи Солнца даже свет искривляет свой путь. А ведь его прямолинейное распространение раньше не вызывало сомнения.

Существует инерционная сила, действие которой не проявляется, пока тело неподвижно, но она сразу же обнаруживает себя, как только тело начинает двигаться. По радиусу вращающегося диска («чертова колеса») передвигается тело за время $t$ из точки $A$ в точку $B$. Если точка $A$ находится от центра на расстоянии $R_1$, а точка $B$ — на расстоянии $R_2$, то линейная скорость вращения этих точек будет $\omega R_1$ и $\omega R_2$, где $\omega$ — **круговая частота вращения** диска. Значит, за время $t$ скорость тела в направлении, перпендикулярном радиусу, изменится на величину $\omega (R_2 - R_1)$. Следовательно, на него будет действовать ускорение

$$a = \omega \frac{(R_2 - R_1)}{t},$$

или сила $F = m\omega v$.

Если скорость тела $v$ вдоль радиуса диска равна нулю, сила $F$ тоже равна нулю. Действует эта сила перпендикулярно движению тела по диску. Называется она силой Кориo-

лиса. На Земле эта сила, например, проявляется при течении рек вдоль меридианов (рис. 5). Если река течёт с севера на юг, то вследствие вращения Земли с запада на восток действует сила Кориолиса и вода подмывает западный берег; если с юга на север — то восточный. В южном полушарии все это происходит наоборот.

## КОЛЕБАНИЯ

Колебания — очень распространенный вид механических движений, и не только механических. Колебательное движение настолько всеобще в природе, что часто его очень трудно отделить от поступательного, особенно в движении элементарных частиц (электронов, атомных ядер и др.). С понятием «колебания» у нас ассоциируется представление либо о волнах на поверхности озера, либо о качании маятника. О волнах подробно рассказано в статьях «Свет», «Звук» и «Электромагнитное поле». Здесь мы остановимся лишь на механических колебаниях, особенно на колебаниях маятника.

**Маятником** называется тяжелое тело, подвешенное на нити к одной точке. Отклоняя

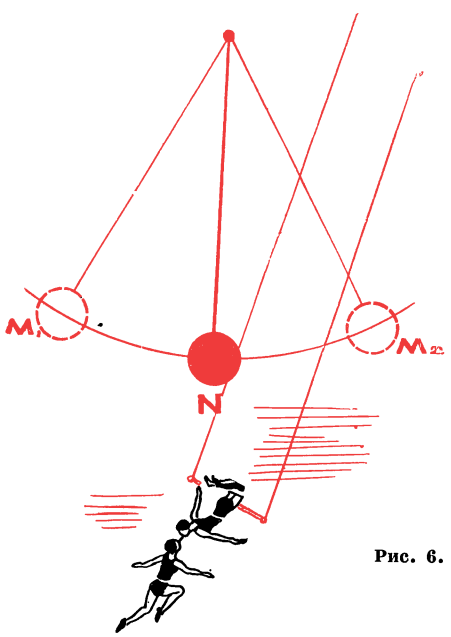



**Рис. 6. Маятник.**

маятник от положения равновесия, мы сообщаем ему потенциальную энергию величиной $mgh$ (рис. 6). Опустив маятник, мы разрешаем ему падать, но не свободно, а по круговой траектории, радиус которой равен длине нити. За время движения по участку $M_1N$ потенциальная энергия тела постепенно переходит в кинетическую и в точке $N$ переход полностью завершится. Здесь скорость маятника можно определить, сравнивая его потенциальную и кинетическую энергии. Скорость в этой точке наибольшая, и тело не останавливается, а двигается дальше по инерции, взбираясь все выше и выше, пока снова в точке $M_2$ вся его кинетическая энергия не перейдет в потенциальную. Здесь скорость равна нулю. С этого момента все начнется сначала. Таким образом, колебания маятника обусловлены периодическим переходом потенциальной энергии в кинетическую, и обратно.

Время полного колебания, т. е. время, за которое тело, покинув какую-то точку траектории, вернется в нее снова, называется п е р и о д о м колебания. Наибольшее отклонение тела от точки равновесия называют а м п л и т у д о й колебания.

При очень малых отклонениях период колебаний не зависит от массы маятника и равен:

$$I = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

В эту формулу входят ускорение силы тяжести $g$ и длина маятника $l$. Эти величины не изменяются при преобразованиях Галилея. Значит, период колебаний одного и того же маятника, наблюдаемый в различных инерциальных системах отсчета, есть величина **инвариантная**, т. е. не зависящая от движения наблюдателя.

С колебаниями мы встречаемся и тогда, когда оттянем от положения равновесия груз, укрепленный на конце пружины. В этом случае потенциальная энергия сжатой пружины также периодически переходит в кинетическую энергию груза, и обратно.

Колебания маятника или колебания груза на пружине, если на них не действуют никакие силы, называются **свободными** или **собственными**, в отличие от вынужденных колебаний, которые совершают эти тела, если на них действует периодически меняющаяся сила. При длительном действии периодической силы маятник и груз начнут, в конце концов, колебаться с частотой действия этой силы. Явление, которое при этом можно наблюдать, называется р е з о н а н с о м.

Если периодическая сила действует на маятник с частотой его свободных колебаний, амплитуда его колебаний очень быстро растет. Даже незначительных сил достаточно, чтобы сильно раскачать маятник.

Собственные колебания механических тел — очень важное понятие. Почти у любого тела и любой конструкции, с которыми мы встречаемся в технике и в повседневной жизни, есть свое собственное колебание (рис. 7). Часто эти колебания очень сложны, и их нельзя представить так наглядно, как колебание маятника или пружины. Более того, у сложного механического тела может быть много собственных колебаний. Если конструкция или прибор находится под действием внешних периодических сил, то очень важно, чтобы период их действия не совпадал с периодом какого-либо из собственных колебаний. В противном случае может наступить резонанс, амплитуда колебаний конструкций выйдет за допустимые пределы, и она разрушится. Были случаи, когда рушился мост, по которому в ногу шла большая группа солдат. Отталкиваясь от моста с частотой его собственных колебаний, они раскачивали его, как качели, и он в конце концов обрушивался.

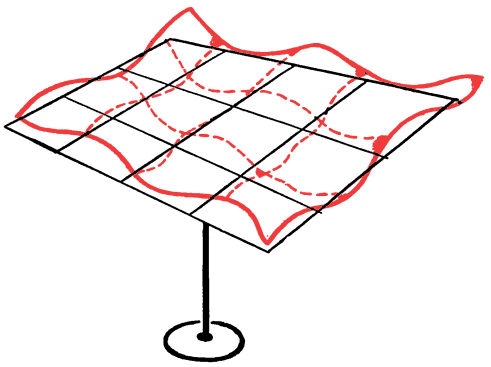


**Рис. 7. У сложного механического тела может быть много собственных колебаний.**

## ОТ МЕХАНИКИ КЛАССИЧЕСКОЙ К МЕХАНИКЕ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ

В этой статье мы не пересказываем школьный курс механики. У нас задача другая: показать, как следует рассматривать движения механических тел в пространстве и во времени. Особое внимание мы обратили на некоторые интересные случаи механических движений.

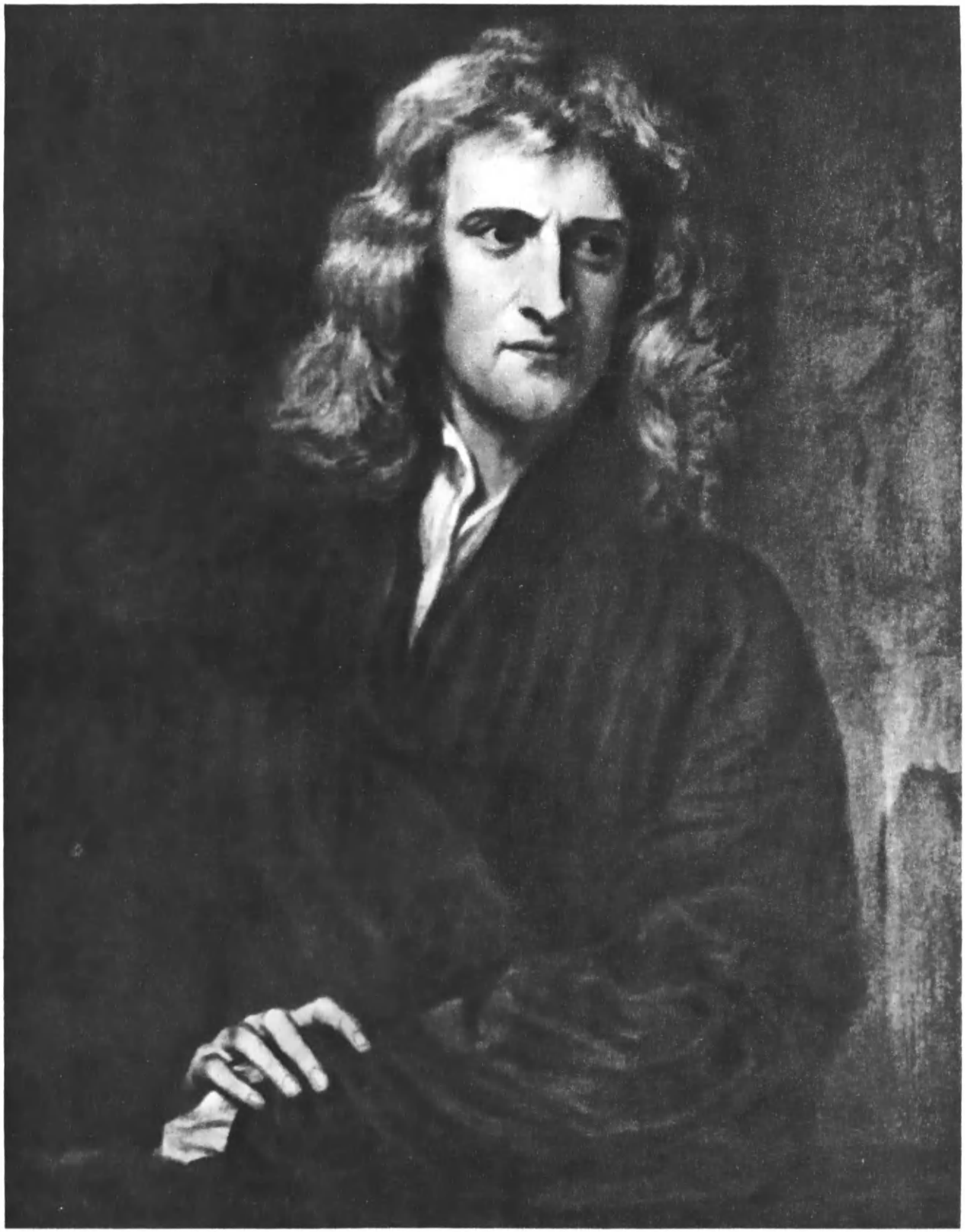
Хотя механика самый старый раздел физики, в ней за последние полвека появилось много нового и неожиданного. Это новое и неожиданное возникло в связи с углубленным изучением таких важнейших физических понятий, как **пространство** и **время**. Разбирая силы тяготения, мы уже отметили, что Эйнштейн объяснил их не столько свойствами притягивающихся материальных тел, сколько свойствами окружающего их пространства. По существу, Эйнштейн воедино связал пространство, время и материю. Это вполне соответствует принципу диалектического материализма: пространство и время — формы существования материи и от нее неотделимы.

Зависимость свойств пространства от присутствия материи Эйнштейн обнаружил позже, чем зависимость от движения наблюдателя. Вот как это было. Ньютон в своей «Механике» допускал существование абсолютного пространства и абсолютного времени. Он писал: «Абсолютное пространство по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным»; «Абсолютное, истинное математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью».

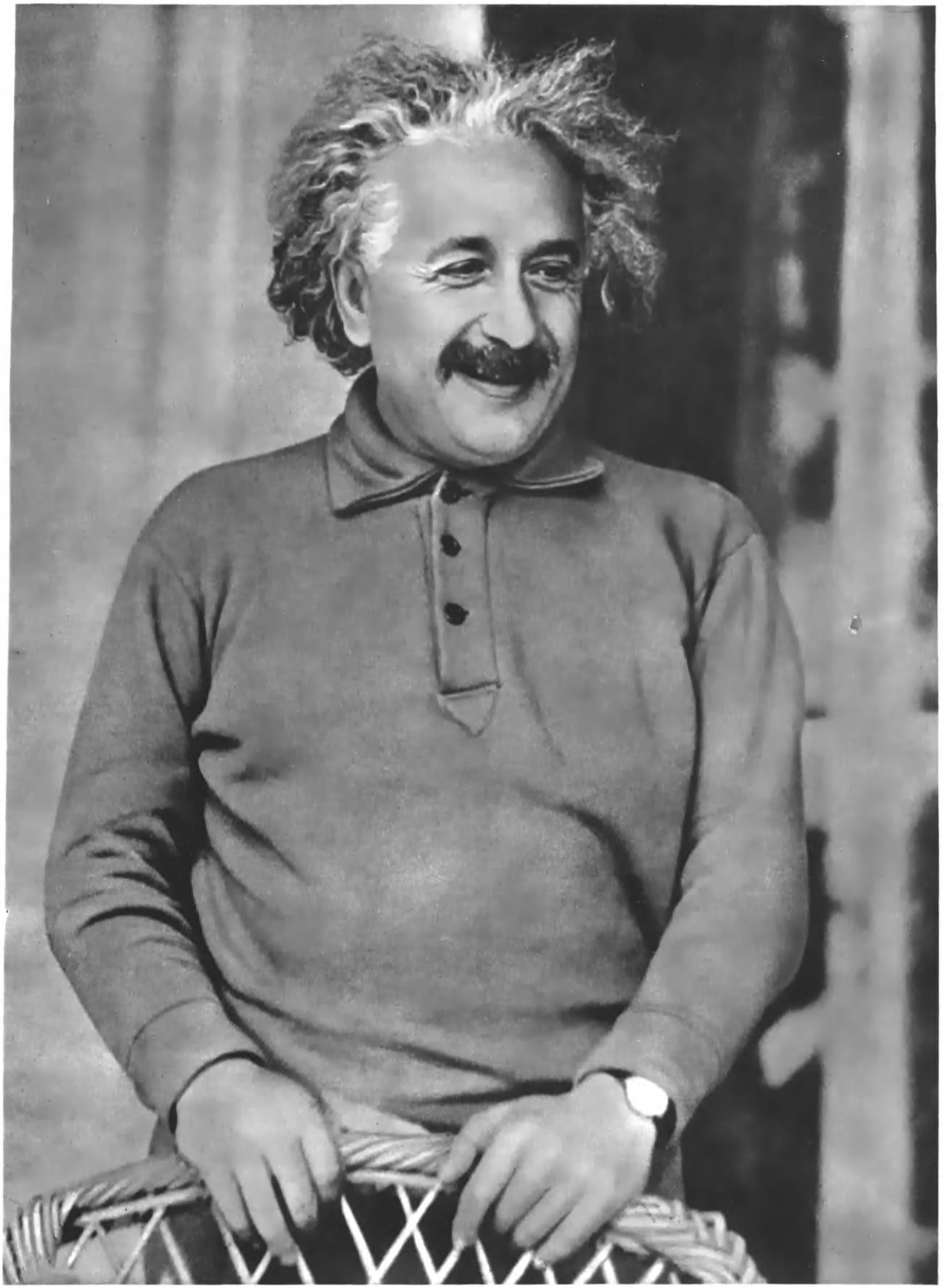
Ньютон не указал, откуда берутся абсолютные пространство и время и как их обнаружить. Просто предполагалось, что вся Вселенная погружена в некую неподвижную пустоту, которая и есть абсолютное пространство, и в этой пустоте равномерно течет абсолютное время. Если это так, то тогда следовало бы найти способ, как измерять движения тел, используя систему отсчета, связанную с абсолютным пространством. Такая система выгодно отличалась бы от инерционных систем, которые, как мы видели, все относительны. Но как обнаружить это абсолютное пространство? Какое явление природы может указать на то, что оно существует?

Предполагалось, что на это указывает распространение света в пустоте. Действительно, чтобы свет звезды дошел до земного наблюдателя, он должен пройти миллионы и миллиарды километров в космическом пространстве, где плотность материи ничтожна. Свет лучше всего распространяется там, где ему не мешает непрозрачное вещество, и можно думать, что «родная стихия» для света — именно пустое пространство.

Это предположение надо было проверить экспериментом. Если луч света распространяется в абсолютном пространстве, то можно установить, что его скорость различна для разных наблюдателей. Другими словами, здесь также должны быть справедливыми преобразования Галилея, как и для всякого механического дви-



ИСААК НЬЮТОН



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

жения. Двигаясь навстречу световому лучу, мы должны измерить бóльшую скорость, чем при движении вдоль него. Тогда, по аналогии с механическим движением, мы сделали бы вывод, что при движении вдоль луча со скоростью света наблюдатель увидел бы этот луч неподвижным.

В конце прошлого века было поставлено множество опытов, определявших скорость света при разных условиях: и когда он идет навстречу к наблюдателю и когда он уходит от него. Наиболее точный опыт впервые поставил американский ученый Майкельсон в 1881 г. В этом и во всех дальнейших экспериментах результат был один и тот же: скорость света остается постоянной и не зависит от движения наблюдателя (или источника света).

Этот вывод резко противоречил всему, что было известно в классической механике. Если мы двигаемся навстречу автомобилю, его скорость складывается с нашей; если двигаемся от него, то вычитается.

А вот со светом получается иначе. Двигаемся ли мы навстречу световому лучу или убегаем от него, в любом случае его скорость относительно нас остается одной и той же: округленно — 300 000 *км/сек*! Было сделано много попыток объяснить такое странное явление, но все они оказались неудовлетворительными.

Только у Эйнштейна хватило научного мужества заявить, что здесь мы имеем дело с новым законом природы: скорость света есть инвариантная величина, не зависящая от движения наблюдателя. Простые алгебраические расчеты показывают, к каким революционным изменениям в наших представлениях о пространстве и времени привело это, казалось, «простое» утверждение.

Пусть, как и раньше, мы имеем две системы отсчета: одну — неподвижную и вторую — двигающуюся относительно первой со скоростью $v$; как только подвижный и неподвижный наблюдатели оказываются рядом, вспыхивает световой сигнал.

Согласно Эйнштейну, скорость распространения этого сигнала одинакова и в первой и во второй системе отсчета.

Путь, пройденный светом в первой системе отсчета, будет: $x = ct$, путь, пройденный светом в подвижной системе, будет: $x_1 = ct_1$ ($c = 300\,000$ *км/сек*).

Легко показать, что преобразования Галилея несовместимы с законом постоянства распространения света. Действительно, по Галилею, $x_1 = x - vt_1$, и, следовательно, $x_1 = (c - v)t_1$, т. е. в подвижной системе отсчета скорость света получается иной, что противоречит закону независимости скорости света от скорости наблюдателя.

Предположение Эйнштейна, что скорость света не зависит от скорости источника или наблюдателя, было тщательно проверено. Выводы оказались почти фантастическими. Оказывается, преобразования Галилея верны лишь приблизительно, их можно применять, когда скорость наблюдателя во много раз меньше скорости света. Но если наблюдатель будет двигаться с огромной скоростью, приближающейся к скорости света, начнут проявляться такие явления, о которых классическая механика и не подозревала,— так называемые **релятивистские эффекты**.

Во-первых, с точки зрения неподвижного наблюдателя геометрические размеры всех пролетающих мимо него тел изменяются: в направлении движения они сокращаются, «сплющиваются». Например, при очень большой скорости пролетающий мимо шар превратится в плоский блин. Во-вторых, и это, пожалуй, самое неожиданное, время у двигающегося наблюдателя идет медленнее, чем у неподвижного (рис. 8), при

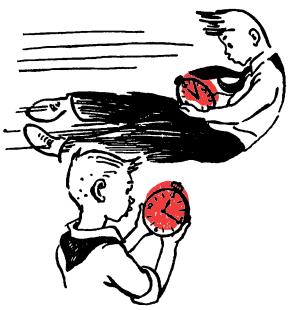


**Рис. 8. Время у движущегося наблюдателя идет медленнее, чем у неподвижного.**

этом чем больше скорость, тем больше замедляется время. Если бы можно было достичь скорости света, время в полном смысле этого слова остановилось бы! В-третьих, масса двигающихся тел тоже оказывается не постоянной, а растет вместе со скоростью.

Из теории относительности следует важный вывод о предельном значении скорости света. **Тела не могут двигаться быстрее света.**

Не следует думать, что выводы теории относительности — фантастика. Увеличение массы двигающихся тел начинает играть существенную роль в ускорителях ядерных частиц. При конструировании этих ускорителей уже принимают специальные меры, чтобы преодолеть

возрастающую инерцию разгоняемых ядерных частиц, им придают дополнительную энергию. В ядерной физике было доказано и замедление времени. Оказалось, что неустойчивые частицы — *мю*-мезоны, которые обнаруживаются в космических лучах, живут дольше, чем *мю*-мезоны, полученные в ускорителях. Удлинение их жизни объясняется тем, что из-за большой скорости движения их время течет медленнее, чем время у их земных двойников.

В эпоху космических полетов вывод теории относительности о замедлении времени для быстро двигающихся тел может приобрести практическое значение. Ведь если двигаться достаточно быстро, то за время жизни человека можно посетить самые отдаленные уголки Вселенной! Подсчитано, что при скоростях, близких к скорости света, можно побывать у далеких звезд, находящихся от Земли на расстоянии в несколько миллионов световых лет, например в туманности Андромеды, и вернуться обратно. Самым удивительным окажется то, что за время путешествия такого «субсветового» космического корабля на Земле время будет течь обычным темпом и пройдет несколько сотен, тысяч и даже миллионов лет! Вполне мыслима и такая ситуация, когда отправившийся в «ближний» звездный полет отец вернется на Землю и обнаружит, что его сын старше его.

Теория относительности предсказывает, что не только ход часов, но и скорость течения всех физических процессов на скоростном космическом корабле будет замедлена. А это значит, что путешественники никак не смогут заметить те удивительные превращения, которые произойдут с ними и со всем, что их окружает.

Правда, ученые все еще спорят: замедлится или не замедлится в космическом корабле, двигающемся с фантастической скоростью, само течение жизни. Сейчас ответить на этот вопрос очень трудно. Будущие эксперименты в космическом пространстве, может быть, прояснят и эту интересную проблему.

Многие волнующие загадки, связанные с выводами теории относительности, были бы решены, если бы удалось построить аппарат, двигающийся с околосветовой скоростью. На Земле нет еще топлива, которое могло бы так разогнать корабль. Такая скорость была бы у космического корабля, если бы силу его тяги создавал ... поток света. Это так называемые **фотонные, или аннигиляционные, двигатели.** Их конструкцию и принцип действия пока что пытается предсказать только научная фантастика.

## «ВОЛЧОК»

Кто в детстве не увлекался замечательной пестро раскрашенной игрушкой — волчком? Она зачаровывает своим удивительным поведением: стоит ее раскрутить — и она «как живая».

В магазине можно купить большой красивый волчок; он состоит из двух соединенных полуконусов, по оси которых пропущен стержень со спиральной навивкой. Поднимая и опуская заводную ручку, волчок можно сильно раскрутить. Однако это не обязательная конструкция волчка. Можно просто вырезать диск из плотного картона и в его центр вставить спичку. Очень хорошие волчки получаются из массивных металлических дисков с тонкой осью и острой ножкой. Старые часы — это целый клад волчков, больших и маленьких. Там что ни зубчатое колесико с осью, то и волчок.

До того, пока волчок не раскрутили, он ничем не интересен. Никакие попытки заставить волчок «стоять», когда он неподвижен, не увенчаются успехом. Но стоит сообщить ему вращательное движение, и он прочно стоит на своей ножке, причем тем прочнее и устойчивее, чем быстрее вращается и чем острее его ножка, т. е. чем меньше сила трения в точке упора. Именно вращательное движение — причина его устойчивости. Из-за трения скорость его постепенно падает, он начинает качаться и, наконец, остановившись, валится на бок.

Если волчок хорошо раскрутить, то он обязательно стремится стать вертикально, даже если первоначально его ось была наклонена. Более того, стоит легонько толкнуть его, он качнется раздругой и снова примет вертикальное положение. По законам своего движения волчок устанавливается всегда так, чтобы направление силы тяжести и ось вращения совпадали.

Если ножка волчка недостаточно остра или если скорость вращения мала, волчок не стоит как вкопанный, а совершает своеобразные колебания, которые называются п р е ц е с с и е й: ось волчка описывает в пространстве конус вокруг вертикальной линии.

Волчок — это лишь один из многочисленных примеров вращающихся тел. В общем виде законы вращения тел очень сложны, но, если у тела правильная геометрическая форма, его вращение подчиняется довольно простым закономерностям. Главная из них — устойчивость вращающегося тела относительно оси вращения.

Чтобы пуля при полете не «кувыркалась» в воздухе, ей придается вращательное движение. Это достигается винтовой нарезкой в ружейном стволе (отсюда и название — винтовка). Вращающаяся пуля на протяжении своего полета сохраняет направление своей оси.

Видали ли вы в цирке, как эквилибрист вращает на тонких палочках тарелки? Вращаясь, они приобретают ту же самую устойчивость, что и волчок. Эквилибристу остается лишь следить, чтобы ось вращения в точности проходила через центр тяжести тарелочки (рис. 9).

**Рис. 9. Самое сложное в работе этого эквилибриста — координировать движения рук, ног и головы. А вращать тарелки на палочках сравнительно несложно: надо лишь следить, чтобы конец палочки был точно в центре дна тарелки.**

Волчок — это не только игрушка. Удивительная устойчивость вращающегося диска широко применяется в науке и технике. В так называемом **гироскопическом стабилизаторе** вращающийся диск придает устойчивость всей системе, в которой он закреплен. Быстро вращаясь, диск активно «сопротивляется» изменению оси вращения. На этом принципе на морских судах работают механизмы, гасящие качку.

Изобретен и такой волчок: его ось заключена в специальной подвеске и может свободно в ней вращаться. Диск волчка раскручивается электромотором. Это так называемый **гироскоп** (рис. 10). Гироскоп, оказывается, может выполнять роль компаса! Если его сильно раскрутить, ось его принимает направление земного меридиана, т. е. будет направлена с юга на север. Такой волчок называется **гирокомпасом**. У него ряд преимуществ перед магнитным компасом. В частности, магнитные силовые линии Земли направлены не строго по меридианам, и, следовательно, магнитная стрелка не всегда правильно показывает север или юг. Особенно это заметно вблизи полюсов Земли. Здесь-то лучше всего пользоваться гирокомпасом.

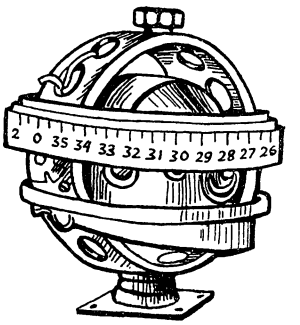



**Рис. 10. Гирокомпас с электрическим приводом.**

Кстати, сама Земля — гигантский волчок, который делает один оборот за сутки. Любопытно, что вращение Земли вокруг оси подвержено прецессионным колебаниям, как будто бы ее ось «толкнули». Солнце — тоже гигантский волчок; скорость вращения его экваториальных областей — один оборот за 25 дней и 9 часов. По-видимому, все звезды во Вселенной вращаются вокруг своей оси, и не только звезды, но и звездные скопления — туманности и галактики.

Вращение физических тел распространяется не только на космические тела, но и в глубь материи, на молекулы, атомы и элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны и т. д.). У элементарных ядерных частиц это вращение получило специальное название — с п и н (по-английски to spin значит вращаться). Многие свойства вещества объясняются вращением элементарных частиц, атомов и молекул.

Глядя на как бы неподвижный поющий волчок, который так прочно стоит, опираясь на одну точку, вспомни, что он воспроизводит явление, присущее всей природе.

■

# ПОЛЕТ В КОСМОСЕ

## ФОРМУЛА ЦИОЛКОВСКОГО

В 1903 г. в Петербурге была опубликована статья Константина Эдуардовича Циолковского «Исследования мировых пространств реактивными приборами». В статье доказывалось, что единственный летательный аппарат, способный проникнуть за атмосферу и покинуть Землю, — это **ракета**. Циолковский разработал теорию ракеты, дал ей математический расчет, указал наиболее выгодное топливо для нее, произвел расчет «ракетных поездов» (многоступенчатых ракет) и пришел к выводу о целесообразности искусственных спутников как стартовых пло-

щадок для ракет, отправляющихся к планетам солнечной системы.

Почему же только ракета может покинуть Землю? Давно утратили значение дирижабли и воздушные шары — летательные аппараты легче воздуха. Огромные, неуклюжие, боящиеся ветра и с трудом поддающиеся управлению, они не годились для покорения воздушной стихии. Но, может быть, на них можно просто подняться ввысь и улететь, например, к Луне?

Нет, наполненный газом шар всплывает в воздушном океане, как кусок дерева в воде. На высоте нескольких десятков километров плотность воздуха падает, и шар становится тяжелее воздуха. А за атмосферой шару просто не в чем плавать.

Люди давно поняли это и принялись совершенствовать летательные аппараты тяжелее воздуха — самолеты. Принцип планирования, скольжения по воздуху подсказали людям птицы, которые тоже тяжелее воздуха. Но крыло может быть полезным только в воздушной стихии. Летательные аппараты, опирающиеся на подъемную силу крыла, беспомощны в сильно разреженной атмосфере. Остается одно — обратиться к **реактивным двигателям**.

Выстрел из ружья сопровождается отдачей. Если бы вес пули равнялся весу ружья, они разлетались бы с одинаковой скоростью на равные расстояния. Отдача произойдет и при холостом выстреле, правда, значительно меньшая, но не потому, что струя пороховых газов оттолкнется от воздуха; отдача произошла бы и на Луне, где воздуха нет.

Раскаленные газы, вытекающие из ракет,— это мельчайшие частицы, имеющие массу и вес. Каждая молекула подобна пуле. Разница в весе и в массе, между молекулой и ракетой, конечно, огромна, но количество непрерывно отбрасываемых частиц газа колоссально, так что скорость ракеты может приблизиться к скорости газов и даже превысить ее.

Отбрасываемые газы и создают реактивную силу, благодаря которой ракета может двигаться и в воздухе, и в безвоздушном пространстве. Она как бы «отталкивается» от струи газов. Чем больше вес и скорость истекающих газов, тем больше реактивная сила, толкающая ракету.

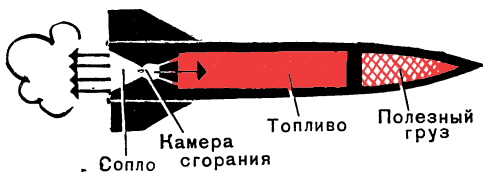
Любая ракета состоит из **корпуса**, **двигателя** и **отсека с полезным грузом**. Бо́льшая часть корпуса заполнена топливом. Двигатель в основном состоит из **камеры сгорания** и **сопла**, которому по ряду причин придается форма раструба. Горючее может располагаться прямо в корпусе или в отдельных баках. Сопло — это

выходное отверстие для газов, образующихся при сгорании топлива.

Циолковский вывел математическую формулу, позволяющую рассчитать максимальную скорость, которую может развить ракета:

$$v = c \cdot \ln \frac{M_1}{M_2} = c \cdot \ln Z.$$

Эта скорость зависит в первую очередь, конечно, от скорости истечения газов ($c$) из сопла ракеты, а скорость газов — от вида топлива и температуры в камере сгорания. Значит, для ракеты нужно наиболее калорийное топливо, т. е. топливо, дающее при сгорании наибольшее количество тепла. Из формулы следует, что скорость зависит также от начальной ($M_1$) и




Общая схема ракеты.

конечной ($M_2$) массы ракеты, т. е. от того, какая часть массы ракеты приходится на горючее, а какая на конструкцию — корпус, механизмы управления, рули, камеру сгорания и сопло.

На формуле Циолковского зиждется весь расчет современных ракет. Один из основных элементов этой формулы — отношение общей **стартовой массы** ракеты к массе ракеты в конце работы двигателя ($Z$) — в честь великого ученого назван числом Циолковского.

Из этой формулы следует вывод: в безвоздушном пространстве скорость ракеты тем больше, чем больше скорость истечения газов при той же массе топлива и чем больше отношение начальной массы (веса) ракеты к конечной, т. е. число Циолковского. Чтобы уменьшить конечную массу ракеты, Циолковский предложил разбить ракету на несколько самостоятельных ракет. Ракетный «поезд» будет двигаться сначала с помощью самой нижней ракеты, которая разгонит его до определенной скорости и после того, как топливо выгорит, будет отброшена. Вторая ступень еще больше увеличит скорость и также отделится от ракеты. Масса (вес) ракеты будет уменьшаться, а скорость — расти.

На первый взгляд может показаться, что выгодно делать в ракете как можно больше ступеней. Но расчет убеждает, что это не так: после шести ступеней максимальная скорость практически остается постоянной.

Циолковский, на много лет опередив своих современников, предсказал на точном языке математики, как человек овладеет безбрежными далями космического пространства. Он указал конкретный путь, по которому должна идти техника межпланетных сообщений.

## ОТ ОГНЕННЫХ СТРЕЛ ДО БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ

Первые ракеты были построены китайцами около двух тысяч лет назад. Это были «огненные стрелы» — небольшие бамбуковые трубки, набитые пороховой массой и закрепленные на палке, служившей стабилизатором. Их применяли для поджога крепостей и против конницы. Иногда ракеты прикреплялись к стрелам, подожженная ракета увеличивала дальность и поражающее действие стрелы. У ракет было и мирное назначение: их запускали в дни больших торжеств.

С течением веков китайцы перестали пользоваться ракетами, но в Индии продолжали применять ракеты как боевое оружие. Тут с ними впервые и столкнулись европейцы. Впечатление было сильным: в Европе такое оружие было неизвестно — древние греки и римляне применяли метательные орудия совсем другого типа. Их катапульты использовали упругую силу туго скрученных волокон. Баллиста была еще проще: огромный лук, укрепленный на деревянной раме. Катапульта и баллиста просуществовали в Европе вплоть до XIII в., т. е. до вторичного изобретения пороха, когда на смену каменным ядрам пришли разрывные гранаты.

Командующий английскими войсками в Индии генерал Конгрев, убедившийся в силе ракет, вывез в Англию образцы и организовал их производство. В первой половине XIX в. реактивная артиллерия была принята на вооружение большинством европейских государств. Значительного развития этот вид оружия достиг в русской армии. Первые образцы русских боевых ракет были созданы генералом А. Д. Засядко. Их применяли в 30-х годах XIX в. в войне на Кавказе и в войне с Турцией.

Ракета была легче и подвижнее пушки, да и стоила гораздо дешевле. А по дальности и точности огня гладкоствольная артиллерия ненамного превосходила ракеты. Казалось, будущее принадлежит ракете. Но случилось иначе: на смену гладкоствольным пушкам появились нарезные орудия; был изобретен бездымный порох, намного увеличивший дальность

и мощь огня артиллерии. Соперничать с мощными орудиями боевая ракета не могла. К началу XX в. она была забыта.

Но ракета вернулась в строй. В начале Великой Отечественной войны на полях сражений прозвучал грозный голос советских **гвардейских минометов — «катюш»**. «Катюша» представляла собой ракету с бездымным порохом, в головной части ее укреплен боевой заряд. Несколько ракет одна за другой стартовали при залпе по направляющим полозьям — рельсам, установленным на подвижном автолафете. Залп с нескольких автолафетов накрывал большую площадь, уничтожал живую силу и выводил из строя боевую технику врага.

Это оружие вызвало многочисленные попытки подражания как у наших союзников, так и в стане врагов.

Еще в 30-х годах, подготавливаясь к захватнической войне, фашисты начали работу над созданием боевой ракеты на жидком топливе. Испытав на себе сокрушительные удары Советской Армии, гитлеровцы удесятерили попытки создать «новое секретное оружие», с помощью которого можно было бы выиграть войну. Так появились реактивные самолеты-снаряды дальнего действия «Фау», которые обрушились на Лондон.

Первый образец получил название Фау-1. Это была 8-метровая воздушная торпеда весом 2,2 *т* с пульсирующим воздушно-реактивным двигателем. Строго говоря, Фау-1 еще нельзя назвать ракетой. Это был самолет-снаряд с небольшими крыльями, да и скоростью Фау-1 не превосходил лучшие истребители тех лет. После первого замешательства английские летчики научились расстреливать его в воздухе.

В 1944 г. в ночном небе появились пикирующие со скоростью 1,5 *км/сек* ракеты Фау-2. Это была уже настоящая ракета. Без крыльев, с небольшим хвостовым оперением 12-метровая сигара, снабженная жидкостным ракетным двигателем, развивала на некоторых участках сверхзвуковую скорость и забиралась на высоту до 100 *км*. Дальность ее доходила до 320 *км*. Если из всех Фау-1 треть вообще не долетала до Англии и только треть добиралась до Лондона, то уже половина Фау-2 попадала в круг радиусом 8—10 *км*.

После создания атомной бомбы внимание военных кругов Запада было обращено на стратегическую авиацию. Но к концу 50-х годов у стратегической авиации появился могучий соперник — *межконтинентальные баллистические ракеты*.

Межконтинентальная ракета, как правило, многоступенчатая. В головной ее части размещается боевой заряд, позади него — приборы управления, баки и двигатель. В зависимости от топлива стартовый вес ракеты может в 100—200 раз превышать вес полезного груза. Современная межконтинентальная ракета — огромное сооружение. Американская ракета «Атлас-С» весит, например, 92 *т* при длине в 30 *м*, т. е. достигает высоты десятиэтажного дома.

Конструкция ракеты должна отвечать ряду требований. Например, необходимо, чтобы сила тяги всегда проходила через центр тяжести ракеты. По мере сгорания топлива центр тяжести должен перемещаться строго по оси симметрии ракеты, иначе она начнет отклоняться от курса или вращаться. Придерживаться курса ракета может с помощью аэродинамических (обычных самолетных) рулей, а в разреженной атмосфере — применить предложенные еще Циолковским **газовые рули**, отклоняющие направление газовой струи. Но аэродинамические рули хорошо действуют только в плотной атмосфере, а газовые делаются из графита или керамики и потому хрупки. Конструкторы пришли к выводу, что проще поставить несколько дополнительных сопел с регулируемой силой тяги или, что еще результативней, поворачивать сам двигатель внутри ракеты. На американской ракете, например построенной по проекту «Авангард», двигатель подвешивают на шарнирах, и его можно отклонять в сторону от оси ракеты на 5—7°. Автопилот следит за курсом и, как только появляется отклонение, дает сигнал, который приводит в действие так называемые **сервомоторы**. Они поворачивают дви-

Залп «катюш».

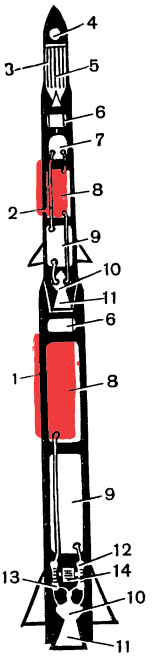
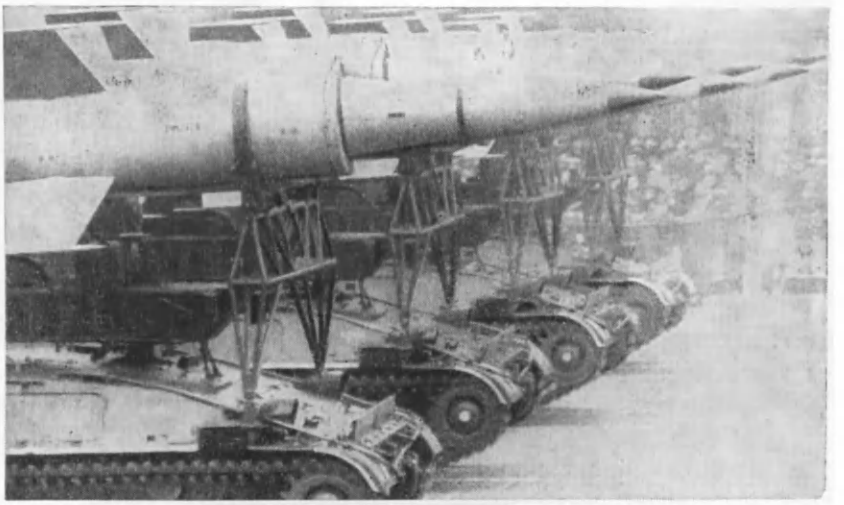
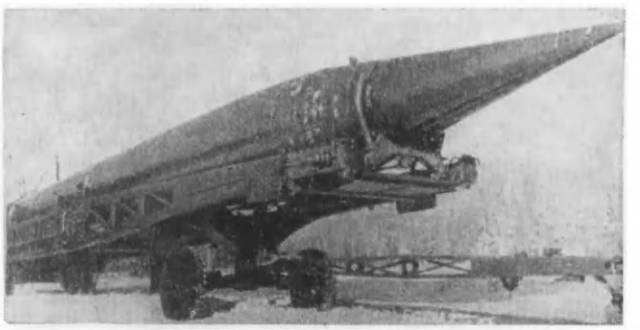



Схема многоступенчатой ракеты: *1* — корпус первой ступени; *2* — корпус второй ступени; *3* — корпус третьей ступени; *4* — полезный груз; *5* — реактивный двигатель третьей ступени; *6* — система управления; *7* — бак со сжатым газом; *8* — бак с окислителем, *9* — бак с горючим; *10* — жидкостнореактивный двигатель; *11* — сопло; *12* — насос для подачи топлива; *13* — насос для подачи окислителя; *14* — газовая турбина, вращающая насосы.





Некоторые типы современных боевых ракет.

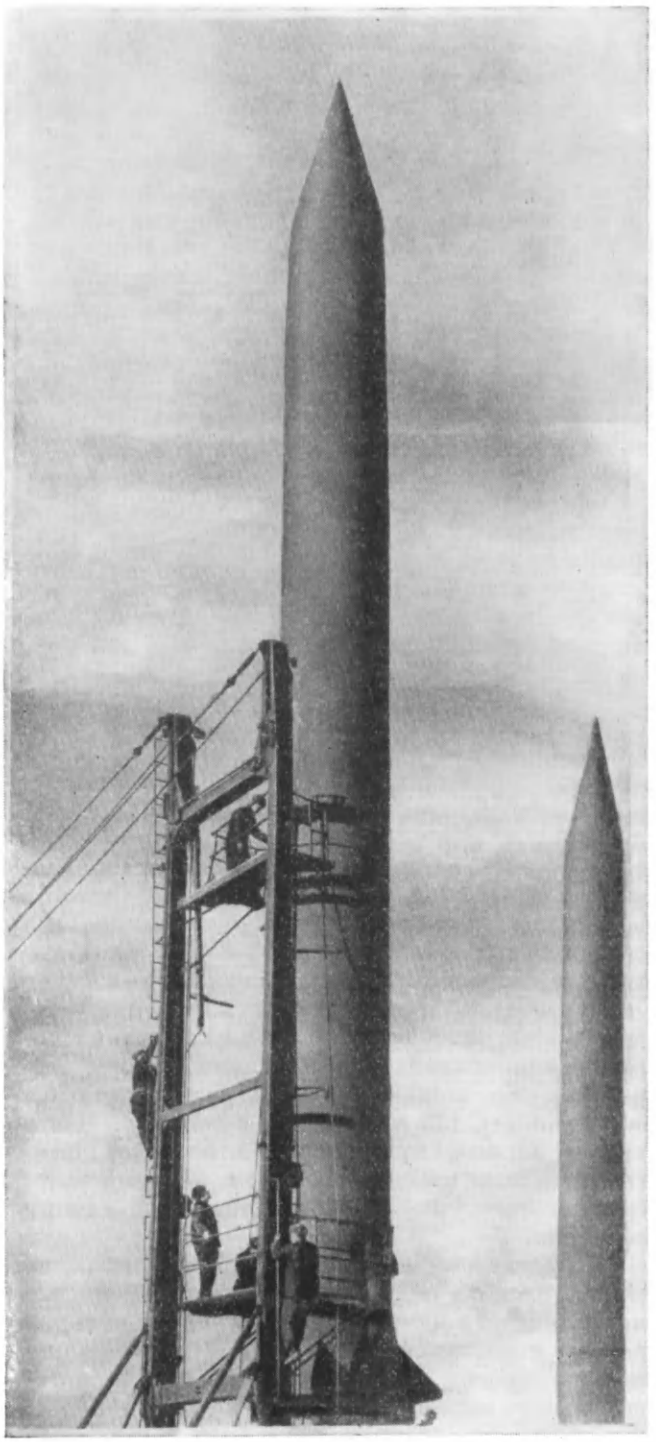
гатель так, что его тяга направляется под углом к оси и ракета возвращается на правильный курс.

Каждая ступень ракеты работает в различных условиях, которые и определяют ее устройство. Мощность и время работы каждого следующего двигателя должны быть меньше, а значит, и конструкция может быть проще. Двигатели баллистических ракет работают как на твердом топливе — порохе, так и на жидком. В качестве жидкого горючего обычно применяют керосин, спирт, а также гидразин, анилин, а в качестве окислителей — азотную и хлорную кислоты, жидкий кислород, перекись водорода. Как окислители еще активнее фтор и жидкий озон, но они очень взрывоопасны. Горючее и окислитель подаются к двигателю под высоким давлением по раздельным трубопроводам, впрыскиваются в камеру сгорания, смешиваются и, сгорая, вырываются из сопла.

Наиболее ответственная часть ракеты — двигатель, а в нем — камера сгорания и сопло. Их изготовляют из особо жаропрочных материалов и в них применяют сложные методы охлаждения, так как температура при сгорании топлива доходит до 3500°. Обычные стали и сплавы не выдерживают такую жару.

Сложны и агрегаты, обслуживающие двигатель; например, насосы, которые подают горючее и окислитель к форсункам камеры сгорания, уже в ракете Фау-2 были способны перекачивать 125 *кг* топлива в секунду. Часто вместо насосов применяют баллоны со сжатым воздухом или другим газом, который вытесняет горючее из баков и гонит его в камеру сгорания.

Запускается баллистическая ракета со стартового устройства. Часто это металлическая мачта или башня, около которой ракету собирают. Площадки на башне размещаются против смотровых люков, через которые проверяют и налаживают оборудование. После наладки ракету заправляют топливом и башня отъезжает. Ракета остается стоять на



Наладка боевой ракеты.

«столе» — массивной железобетонной плите, в центре которой сделан канал для равномерного отвода газовой струи.

Чтобы обеспечить безопасность и неуязвимость боевых ракет, все стартовое устройство размещают иногда под землей, в стволе вертикальной шахты. Почти так же неуязвимы ракеты подводных лодок, стартующие из-под воды.

Подводный старт ракеты — величественное зрелище. Ровная поверхность моря вдруг начинает бурлить, и вот возникает бурун — клокочущий холм из белой пены. Из его центра стремительно вылетает длинный блестящий корпус ракеты. Еще мгновение — и бурун осел, вместо него в воде образуется воронка, которую роет столб пламени, рвущийся из сопел ракеты...

По поверхности воды расползаются бурно растущие клубы дыма, а ракета сначала медленно, как бы нехотя, а потом все стремительнее вертикально устремляется в небо. Рев двигателя затихает, и одновременно тает в воздухе пламя — след огненного хвоста...

По заранее рассчитанной траектории ракету ведет система управления. Одна за другой сбрасываются отработавшие ступени, и, когда подается команда о выключении последнего двигателя, головная часть ракеты уже приобрела заданные скорость и направление. Дальше ракета летит по инерции, описывая почти строго эллиптическую траекторию. Значительная часть траектории проходит там, где сопротивление воздуха практически отсутствует,— на высоте больше тысячи километров над Землей.

**Первый запуск межконтинентальной баллистической ракеты** был осуществлен в СССР в августе 1957 г. Пройдя несколько тысяч километров, ракета попала точно в заданный район. Неоднократные запуски наших межконтинентальных ракет в район Тихого океана показали исключительную точность систем наведения. Пролетев около 12 500 *км*, предпоследняя ступень ракеты отклонялась от расчетной точки всего на несколько километров. Стратегические ракеты за 30—35 минут покрывают расстояние свыше 10 тыс. *км* — современному бомбардировщику на это потребуется минимум 10 часов. Чтобы лучше предста-

**Автоматическая космическая станция исследует одну из планет, проходя вблизи ее поверхности.**

**На обороте:**
**Так можно представить себе мягкую посадку космической ракеты на поверхность далекой планеты.**

▶

вить себе скорость полета современной ракеты, достаточно сказать, что она более чем в 10 раз превышает начальную скорость пушечного снаряда!

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАКЕТЫ — ОРУДИЕ НАУКИ

Еще в 20-е годы ученые нашей страны начали создавать ракеты для исследования атмосферы. В 1933 г. была запущена **первая ракета с жидкостным двигателем.**

С 1949 г. у нас регулярно ведется исследование атмосферы метеорологическими ракетами. В 1957 г. такая ракета вызвала восхищение всех участников Международной конференции ученых-метеорологов.

Метеорологической ракете практически незачем подниматься выше 90 *км*. Для изучения же физики верхних слоев атмосферы применяют специальные исследовательские ракеты. Это более «солидные» аппараты. Они должны подняться как можно выше и получить данные обо всех слоях атмосферы и даже о заатмосферном пространстве.

На первых ракетах исследовательская аппаратура весила всего 120—130 *кг*. Ракета, стартовавшая в мае 1957 г., несла на борту аппаратуру весом уже в 2200 *кг* и поднялась на высоту 212 *км*.

В феврале 1958 г. мощная советская ракета несла более полутора тонн научной аппаратуры, достигла высоты 473 *км* и установила мировой рекорд высоты для одноступенчатых ракет. В течение всего полета ракета стабилизировалась специальными устройствами, которые не давали ей вращаться. Это увеличило точность измерений; их результаты непрерывно передавались по радио или записывались на магнитную пленку.

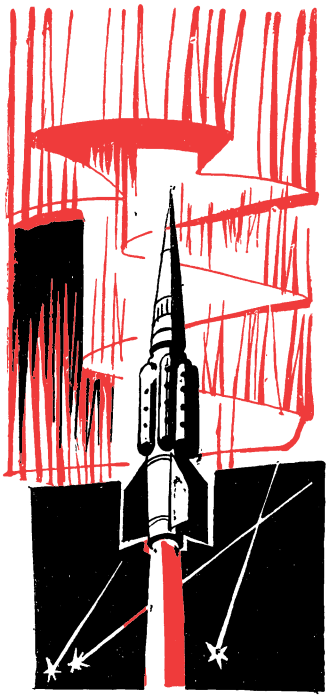
Большая грузоподъемность советских ракет позволила, кроме аппаратуры, поднимать и подопытных животных. Контейнер с животным снабжали устройством для регенерации (восстановления) состава воздуха, киноаппаратом и приборами, контролирующими поведение животного в полете.

На первом этапе этих опытов герметическая кабина с собакой спускалась на парашюте с высоты 100—210 *км*. Исследования показали, что ускорения, возникающие при взлете ракеты и при вхождении кабины в плотные слои атмосферы, животные переносят без вреда для себя. Так же перенесли они и состояние невесомости, которое длилось 6 минут.

Старт стратегической ракеты.

Второй этап исследований должен был дать ответ на более сложный вопрос: сможет ли животное покинуть ракету на большой скорости и большой высоте? Ученые разработали герметические кабины и скафандры, в которых автоматически поддерживались необходимое давление воздуха и нужное содержание кислорода. В них животные катапультировались, т. е. как бы «выстреливались», с высоты до 110 *км* при скорости полета 1—2 *км/сек*. Катапультирование производилось в наиболее сложных условиях: на нисходящих траекториях и даже во время беспорядочного падения ракеты. Опыты удались. Даже у тех животных, которые поднимались в верхние слои атмосферы несколько раз, не обнаружено никаких вредных последствий от такого приземления.

Ракеты нужны для исследования атмосферы, даже если существуют искусственные спут-



Исследовательская ракета.

ники Земли. Спутник летит, как правило, значительно выше 200 *км*, поэтому слои, лежащие ниже его орбиты, остаются неизученными. Кроме того, ракеты позволяют сделать «высотный разрез» атмосферы, т. е. провести наблюдения в одно и то же время на разных высотах. Ракетные исследования, искусственные спутники, а также изучение ионосферы радиометодами взаимно дополняют друг друга.

Программа Международного геофизического года предусматривала обширные ракетные исследования. Ракеты стартовали в средних широтах, и с Заполярья, с Земли Франца-Иосифа, и в Антарктиде, где первая ракета была запущена с экспедиционного судна «Обь». Все это дало возможность накопить ценнейшие сведения о физических явлениях в верхних слоях атмосферы и сделать интересные биологические наблюдения.

## ПЕРВЕНЦЫ КОСМОСА

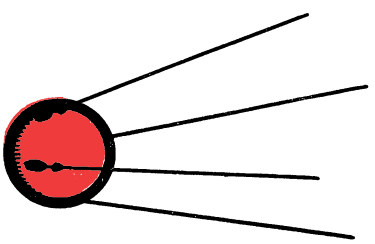
4 октября 1957 г. на Земле началась космическая эра. Советская ракета превысила первую космическую скорость и вывела на орбиту первый искусственный спутник Земли. Вес его был сравнительно мал, но его знаменитые позывные «бип-бип» разнеслись по всей планете. В те незабываемые дни блестящий металлический шар с усиками антенн стал символом человеческого гения.

**Первый спутник** весил всего 83,6 *кг*, но вывести на орбиту его могла только огромная ракета невиданной до той поры мощности. Последняя ступень космической ракеты составляет 4—5% ее общего веса, а вес самого спутника должен быть в несколько раз меньше. Если увеличить его вес только на 1 *кг*, то ракета должна стать тяжелее на 250—300 *кг*. Тем значительнее успех советских ученых и инженеров, запустивших **второй спутник** весом более 500 *кг*, а третий — свыше 1300 *кг*! Вес наших спутников красноречивее всяких слов свидетельствовал, что была создана и удачная конструкция баллистической ракеты, и мощные, но в то же время легкие двигатели, найдено прекрасное топливо и разработана точнейшая система управления.

Наш первенец был одет в легкий «костюм» из алюминиевых сплавов. Защитная оболочка спутника прежде всего должна быть достаточно прочной, чтобы предохранить приборы от грозного врага — метеоритов.

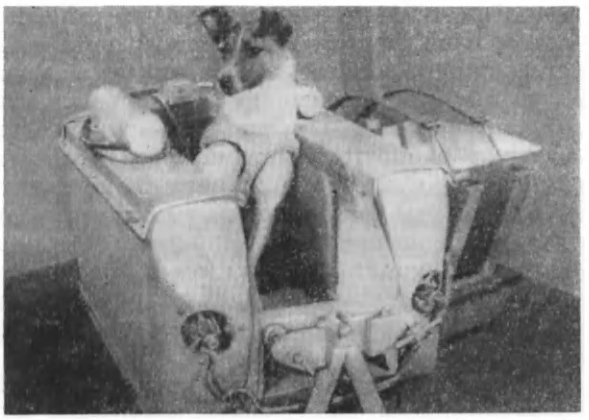
Когда спутник освещается Солнцем, он сильно нагревается; когда находится в тени, резко охлаждается. Разность температур может достигать примерно 100°. А ведь для приборов необходим нормальный тепловой режим. Это не только сложная, но и совершенно новая задача. И ее решили! Поверхность оболочки спутника обработали так, что она отражала основную массу солнечных лучей, а в тени не давала теплоте спутника излучаться в пространство. Чтобы распределить теплоту по всему спутнику равномерно, его заполнили азотом. При помощи вентиляционных устройств азот циркулировал между приборами и оболочкой, нагреваясь у более теплых частей и отдавая теплоту более холодным.

На первом спутнике были установлены два радиопередатчика. Обычные любительские приемники принимали их сигналы на расстоянии в сотни и даже тысячи километров. Эти сигналы не только рассказывали, где именно находится спутник и какова траектория его полета. Едва приметные изменения частоты и длительности сигналов сообщали ученым о том, что происходит со спутником, и в первую очередь о величине и колебаниях температуры внутри его оболочки.



Первый искусственный спутник Земли.

Для сложных приборов, особенно для системы терморегулирования и двух передатчиков, нужны были достаточно мощные, а значит, и тяжелые источники питания. Поэтому много места и, очевидно, веса было отведено



**Первый космический пассажир — Лайка — в раскрытом контейнере.**

батареям химических источников электропитания. Они иссякли примерно через 20 дней, и спутник умолк.

Запуск **второго спутника** 3 ноября 1957 г. ознаменовал новый этап разведки космического пространства: была создана заатмосферная научная лаборатория со сложной аппаратурой и живым существом — собакой Лайкой.

Сам контейнер с собакой весит не так уж много, но живому существу нужна подходящая температура, свежий воздух, питание, и, чтобы снабдить его всем этим, нужны сложные устройства. Автоматические приборы вовремя проветривали контейнер, перемешивали воздух, поддерживали нормальную температуру, кормили и поили собаку и удаляли продукты жизнедеятельности животного. Вместо тяжелых баллонов с жидким кислородом в контейнер поместили высокоактивные химические соединения, выделяющие кислород. Другие соединения поглощали избыток водяных паров, углекислоту и аммиак. Так, в кабине с помощью особых устройств — системы регенерации — поддерживалось содержание кислорода в пределах 20—40%, углекислого газа — не выше 1% и обеспечивалось нормальное атмосферное давление. Первое космическое жилье оказалось надежным и удобным.

Лайка была обеспечена и едой и питьем. Воду в состоянии невесомости нельзя налить в блюдечко: она соберется в шар и будет висеть в воздухе или растечется, смачивая стенки. Из резервуара ее нужно выдавливать. Если просто положить перед Лайкой мясо, оно начнет свободно перемещаться по всему контейнеру, а если собака станет прыгать за мясом, она разобьется о стенки или потолок. Поэтому движения Лайки ограничили, а поили и кормили ее специальные приборы по расписанию.

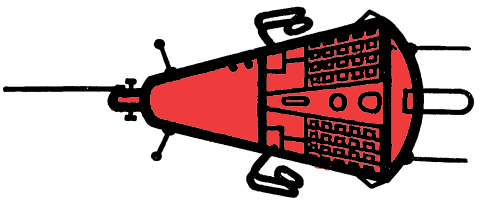
В корпусе ракеты располагались также приборы для изучения космических лучей и основная часть источников энергии. Одно лишь помещение для собаки со всеми вспомогательными приборами и механизмами требовало значительного количества электроэнергии. Кроме того, батареи должны были питать физические измерительные приборы и аппаратуру телеметрии. Поэтому мощные передатчики, расходовавшие много энергии, перестали работать на втором спутнике гораздо быстрее, чем на первом.

15 мая 1958 г. на орбиту вышел третий советский искусственный спутник Земли. Газеты всего мира запестрели волнующими заголовками: «Красная луна весом в полторы тонны»; «Россия выстрелила гигантским спутником»; «Спутник в сто раз больше нашего». Этот новый блестящий триумф советской науки — яркое свидетельство неоспоримых успехов прежде всего нашей ракетной техники и радиоэлектроники.

**Третий советский спутник** принципиально ничем не отличался от первых двух. Но с технической и научной точки зрения это был огромный шаг вперед. Прежде всего были подняты в космос и выведены на орбиту 1327 *кг* полезного веса (вес автомобиля «Волга»). Орбита спутника охватывала еще большую часть околоземного пространства; сразу после запуска высшая ее точка находилась в 1880 *км* над Землей — в два раза выше, чем у первого спутника.

Каждый новый спутник, даже самый маленький, обогащает науку. Но для фундаментального изучения космического пространства единственное радикальное средство — это искусственные спутники большого веса. Третий советский спутник, большой и тяжелый, вместил в себя приборы для измерения давления и ионного состава воздуха, концентрации положительных ионов, напряженности магнитного поля, интенсивности корпускулярного излучения Солнца и другую аппаратуру. Все это могло быть поднято в космос благодаря огромной мощности ракеты.

Для вычисления координат любых спутников используют электронно-счетные машины. Данные с наблюдательных пунктов передаются в общий координационно-вычислительный центр, там их автоматически вводят в быстродействующие счетные машины, которые и вычисляют основные параметры орбиты. Слож-



Третий советский спутник.

ный комплекс электронных и радиотехнических устройств обеспечивает быстрое и точное определение координат летящей лаборатории.

## ЗАПУСК СПУТНИКОВ В США

31 января 1958 г., через четыре месяца после запуска первого советского спутника, с полигона на мысе Канаверал (ныне мыс Кеннеди) стартовала 30-тонная ракета. Ее четвертая ступень с приборным отсеком стала первым американским спутником.

Свой первенец американцы назвали **«Эксплорер»** («Исследователь»). Это был тонкий металлический цилиндр, похожий на артиллерийский снаряд, длиной 2 *м* и диаметром 15 *см*. Весил спутник чуть больше 13 *кг*, а его научные приборы — 4,5 *кг*. «Эксплорер» нес на борту два слабых радиопередатчика, счетчик Гейгера для регистрации космических лучей, термопары для измерения внутренней и наружной температуры, пьезопластинки для регистрации метеоритов и батареи электропитания, которые должны были обеспечить двухнедельную работу одного передатчика и двухмесячную работу другого.

Второй американский спутник весил всего 1,5 *кг* и представлял интерес в основном для конструкторов ракеты **«Авангард»**, доказавших, что эта ракета все-таки может вывести спутник на орбиту. Третий спутник был точной копией первого, правда, весил он на 600 *г* больше. Лишь восьмой американский спутник имел ощутимый полезный вес — 67,5 *кг*, но и он не превысил размеры первого советского спутника.

В 1964 г., создав мощную ракету-носитель **«Сатурн»**, американцы смогли, наконец, вывести на орбиту два многотонных спутника.

## АВТОМАТИЧЕСКИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫЕ СТАНЦИИ

2 января 1959 г. наша страна изумила мир новым поразительным достижением: была запущена **ракета в сторону Луны.**

Пробив в вертикальном полете наиболее плотные слои земной атмосферы, ракета стала постепенно отклоняться от вертикали, выходя на заданную ей траекторию. В конце участка разгона последняя ступень ракеты набрала расчетную скорость и автоматическая система управления выключила ракетный двигатель. Скорость ракеты расходовалась на то, чтобы преодолеть притяжение Земли. На высоте 10 000 *км* эта скорость упала до 3,5 *км/сек* и продолжала уменьшаться, пока не начала снова расти под влиянием возрастающего притяжения Луны.

Через 34 часа полета, пройдя 370 тыс. *км*, ракета пересекла орбиту Луны и вышла в межпланетное пространство. Так как 2 января Луна находилась впереди Земли с внутренней стороны ее орбиты, ракета, миновав Луну, некоторое время также находилась внутри орбиты Земли. Внутри земной орбиты ракета пробыла больше двух месяцев и прошла около 900 млн. *км*. Затем она пересекла земную орбиту и стала первым искусственным спутником Солнца, двигаясь вокруг него со скоростью 32 *км/сек*. Плоскость орбиты этой маленькой «планеты» почти совпадает с плоскостью орбиты Земли. Но орбита новой «планеты» не так симметрична относительно Солнца, как орбита Земли; приближаясь в перигелии (ближайшая к Солнцу точка орбиты) на 146 млн. *км*, она в афелии (наиболее далекая от Солнца точка орбиты) удаляется на 197 млн. *км*.

Искусственная планета подходит в четыре раза ближе к Марсу, чем Земля,— до Марса осталось бы лететь всего 15 млн. *км*. Стоит еще немного вытянуть орбиту этой новой планеты, и она дойдет до орбиты Марса. Это означает, что советские ученые уже тогда могли обеспечить такую скорость, которая необходима для полета ракеты к Марсу или к Венере.

Орбиты Земли и маленькой «планеты» пересекаются. Значит ли это, что они могут встретиться? Новая «планета» обращается вокруг Солнца медленнее, чем Земля. Так как ракета и Земля движутся вокруг Солнца с разными скоростями, расстояние между ними будет то увеличиваться, то уменьшаться. Если бы на полет ракеты влияло только притяжение Солнца, то, облетев вокруг него по эллипсу, она вернулась бы в ту же точку и встреча ее с Землей была бы возможна. Но так как ее уже отклонила Луна, а в дальнейшем ее движение, как говорят астрономы, будет подвергаться возмущениям под влиянием других планет, она уже не вернется к месту старта.

Эта ракета была оснащена научной и измерительной аппаратурой и имела 4 мощных радиопередатчика. Все приборы и батареи электропитания были размещены в шарообразном контейнере, установленном в носовой части последней ступени ракеты.

Когда кончился участок разгона ракеты, автоматика выключила двигатель последней ступени и подала сигнал об отделении контейнера от ракеты. Специальный механизм вытолкнул контейнер вперед. Толчок был не очень сильным, контейнер отдалился на небольшое расстояние от ракеты, и они продолжали свой путь по намеченной орбите. Этот контейнер и стал спутником Солнца.

Отделить контейнер от ракеты нужно было для того, чтобы исключить влияние ее металлических конструкций на показания прибора, предназначенного для измерения магнитного поля Луны. Корпус последней ступени ракеты мог бы стать помехой и в работе антенн, так как для ультракоротких волн (1,6 *м*) он оказался бы экраном и создал бы своеобразную радиотень. Приборы нужно защищать не только от метеоритов, но и от резких колебаний температуры; если контейнер не отделить от ракеты, пришлось бы регулировать температуру и ее корпуса.

12 сентября 1959 г. в нашей стране была запущена в сторону Луны **вторая космическая ракета**. Конструкцией и оснащением она была похожа на свою предшественницу. В приборном контейнере ракеты находился вымпел с изображением Герба Советского Союза. Он был доставлен на Луну как памятник великому подвигу советского народа, проложившего человечеству путь в космос.

Чтобы составить себе представление о степени точности, которую необходимо было выдержать при запуске этой ракеты, достаточно привести несколько цифр. Ошибка в скорости ракеты всего на 1 *м/сек*, т. е. на 0,01% от величины полной скорости, отклонила бы точку встречи с Луной на 250 *км*. Если вектор скорости отклонился бы от расчетного направления на одну угловую минуту, точка встречи сместилась бы на 200 *км*. Существенно влияли на точку встречи и координаты места, где двигатель был выключен. И наконец, опоздание со стартом на 10 *сек* отклонило бы точку встречи также на 200 *км*. То, что ракета успешно достигла Луны, убедительно свидетельствовало о том, что к этому времени наша страна располагала не только самыми мощными в мире ракетами, но и самой совершенной системой автоматического управления.

Прошло 20 дней, и в Советском Союзе во вторую годовщину запуска первого спутника была запущена третья космическая ракета. **«Луна-3»** весила 2,5 *т*. На этот раз ракета, оснащенная фототелевизионной аппаратурой, обогнула Луну и вернулась в район Земли. Эта станция весила 278,5 *кг*. Она сфотографировала и передала на Землю фотографию невидимой нам стороны Луны (подробнее об этом полете см. в т. 2 ДЭ, в ст. «Человек вышел в космос»).

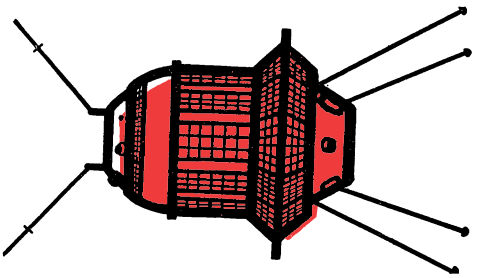
Полеты к Луне продолжаются. В 1965—1966 гг. на советских станциях **«Луна-6»**, **«Луна-7»**, **«Луна-8»**, достигших поверхности Луны, отрабатывалось взаимодействие устройств, обеспечивающих мягкую посадку на эту планету. **«Луна-9»** совершила мягкую посадку и передала первые детальные снимки лунного ландшафта.

Дальний космос начали изучать в нашей стране с автоматической станции **«Венера-1»**. Затем был запущен **«Марс-1»**. Сейчас изучение ведется станциями типа **«Зонд-1»**. Все они стартуют с тяжелых спутников, выведенных на промежуточную орбиту. В этих полетах отрабатываются различные системы станций в условиях длительного пребывания в космосе: системы ориентации и коррекции полета, радиосистемы, обеспечивающие передачу многочисленных сообщений через громадное космическое расстояние. Кроме того, накапливается опыт в фотографировании планет и проводятся научные исследования.

18 июня 1965 г. была запущена в направлении к Марсу автоматическая станция **«Зонд-3»**. Она оснащена аппаратами для изучения космоса, проверки новых систем ориентации, отработки плазменных двигателей, испытания различных металлов, сплавов и пластмасс при воздействии космического пространства.

Проходя мимо Луны, станция сфотографировала на ее невидимой стороне те участки, которые не попали в снимки 1959 г. Траектория полета мимо Луны была выбрана так, чтобы лунная поверхность находилась в определенных условиях освещенности, когда горы отбрасывают большую тень.

Станция начала фотографировать Луну с расстояния в 11,5 тыс. *км*, а закончила на расстоянии в 9,9 тыс. *км*. Наибольшее ее приближение к Луне — 9,2 тыс. *км*. Метод фото-



«Луна-3».

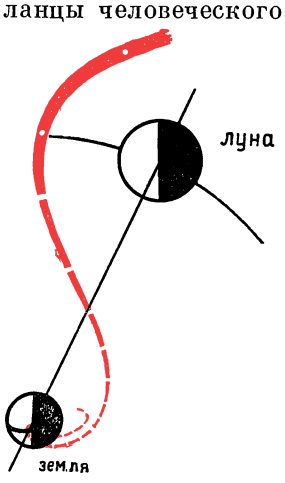
графирования был такой же, какой применялся на станции «Луна-3», но передача шла с разложением кадра на 1100 строк (в обычном телевидении четкость соответствует 500—600 строкам).

С «Зонда-3» было получено 25 снимков. Качеством эти фотографии не уступают лучшим снимкам видимой стороны Луны, получаемым с помощью телескопа на наземных обсерваториях.

Астрономы, изучив снимки, оценили количество и размеры кратеров и «морей». Выводы, сделанные на основании снимков 1959 г., подтвердились: на обратной стороне мало «морей» и вся она более светлая и гористая. Вдоль гигантских трещин расположены цепочки кратеров. Таких образований на видимой стороне Луны нет.

16 сентября на «Зонде-3» была проведена коррекция полета. Система астронавигации сориентировалась по Солнцу и звезде Канопус и развернула станцию в заданное положение. По команде с Земли был включен двигатель, и направление полета изменилось, как и было предусмотрено.

Зондирование космоса продолжается. Посланцы человеческого разума все дальше проникают в космос и подготовляют пути для полетов человека.




«Зонд-3» в момент фотографирования Луны.

Разведку Луны ведут и в США. В марте 1959 г. ракета **«Пионер-IV»** прошла на расстоянии 60 000 *км* от Луны (вместо расчетных 25 000 *км*) и вышла на орбиту вокруг Солнца. Из девяти попыток запуска ракет к Луне по проекту «Пионер» только две увенчались относительным успехом. Более удачными были запуски двух аппаратов **«Рейнджер»** («Странник»). «Рейнджер-III» упал на обратную сторону Луны, причем вся радиоаппаратура вышла из строя задолго до этого. «Рейнджер-IV» сфотографировал Луну, но снимки оказались не годными. И только полеты «Рейнджер-VII» и «Рейнджер-VIII» увенчались успехом. Сближаясь с Луной, аппараты беспрерывно вели телевизионную съемку и передавали на Землю изображение лунной поверхности. «Рейнджер-VII» падал на Луну со скоростью 2 *км/сек*. Его телекамера схватывала все более мелкие детали — отдельные вершины, глыбы, трещины. Потом уже снимки, переданные на Землю, были смонтированы в виде киноленты. И ученые, просматривая этот фильм, получили полную иллюзию, будто они сами падают на Луну. Ракета упала и разбилась. Но в последние моменты работы ее телекамерами можно было различить на поверхности Луны детали размером около 50 *м*.

## К ВЕНЕРЕ И МАРСУ

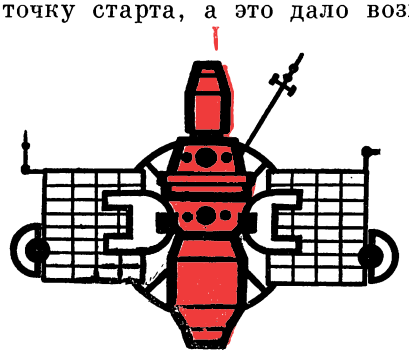
Советские ракеты приобретают все большую и большую мощность, а вместе с этим растет и возможность познавать окружающее нас космическое пространство. Ракета-носитель второго советского спутника могла бы доставить на Луну груз в несколько килограммов, а уже через два года к Луне была послана автоматическая межпланетная станция (АМС) «Луна-3» с общим весом ракеты 2,5 *т*.

Но не только мощность двигателей определяет возможности космических кораблей, не менее важно совершенствовать систему управления. Оно должно быть чрезвычайно точным. Если полет ракеты рассчитан на 8—10 *км/сек*, ошибка в скорости даже на несколько метров в секунду считается недопустимой. Также недопустима и ошибка на доли градуса в направлении полета. Но мало этого. Чтобы послать к Марсу или к Венере насыщенную приборами автоматическую станцию, нужно увеличить мощность ракеты или резко усложнить схему старта, т. е. стартовать со спутника, как предлагал еще Циолковский.

Эта задача была блестяще решена советскими учеными и инженерами. 12 февраля 1961 г. с тяжелого спутника, выведенного предварительно на орбиту вокруг Земли, стартовала космическая ракета с автоматической станцией **«Венера-1»**. Когда ракета достигла заданной точки пространства с заданными направлением полета и скоростью, ее двигатель выключили.

В тот же момент автоматическая станция отделилась от ракеты и начала свой свободный полет к Венере.

Смысл такого сложного запуска в том, что затрата энергии на полет ракеты зависит от географической широты, на которой дан старт. Запуск ракеты с промежуточной орбиты позволил выбрать оптимальную (наивыгоднейшую) точку старта, а это дало возможность умень-



«Венера-1».

шить вес топлива и соответственно увеличить вес станции.

Кроме того, в этом случае ракета может достаточно долго находиться на круговой орбите. При кратковременном наблюдении удаляющейся ракеты даже электронно-счетная машина не может достаточно точно вычислить ее орбиту. Если же ракета сделает до старта несколько витков, можно провести достаточное количество измерений ее положения в пространстве и по ним вычислить орбиту ракеты с очень большой точностью. Тогда и оптимальная точка старта с орбиты будет определена точнее.

При подходе к выбранной оптимальной точке тяжелый спутник был стабилизирован — «успокоен»; система ориентации так развернула его, что ракета приняла положение, соответствующее направлению старта. В точно рассчитанной точке пространства включился двигатель, и с плывущего в состоянии невесомости космического «ракетодрома» стартовала ракета, несущая к Венере автоматическую станцию весом 643,5 *кг*.

Орбита Венеры проходит между орбитой Земли и Солнцем. Поэтому ракета должна стартовать в сторону, противоположную движению Земли, т. е. уменьшать свою скорость, чтобы «падать» в сторону Венеры.

Через каждые 5 дней проводились сеансы связи со станцией, было получено много новых сведений об околосолнечном пространстве. 27 февраля 1961 г., когда наступило время очередного сеанса, войти в связь по неизвестной причине не удалось. 19—21 мая станция прошла примерно в 100 тыс. *км* от Венеры и стала искусственной планетой — спутником Солнца.

Из ближайших планет, кроме таинственной Венеры, покрытой сплошным облачным покрывалом, наибольший интерес всегда вызывал Марс. В сильные телескопы можно увидеть на Марсе белые полярные шапки, линии «каналов» и огромные различно окрашенные области. Окраска и форма пятен на Марсе изменяются в зависимости от времени года. Новейшие спектрографические исследования дают возможность предполагать, что на планете возможно существование живых организмов.

Разгадать тайны Марса, только наблюдая его в телескоп, нельзя. Нужны полеты ракет. 1 ноября 1962 г. в Советском Союзе была запущена автоматическая межпланетная станция **«Марс-1»**. Полет был осуществлен тем же способом, что и при запуске станции к Венере. Только орбита ее была иной. (Возможные орбиты полетов к Марсу описаны в т. 2, в ст. «Человек вышел в космос».)

Осуществить полет к Марсу было сложнее, чем к Венере, из-за большего расстояния до

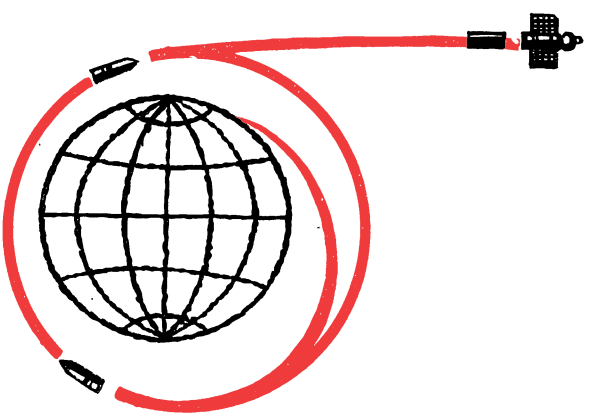
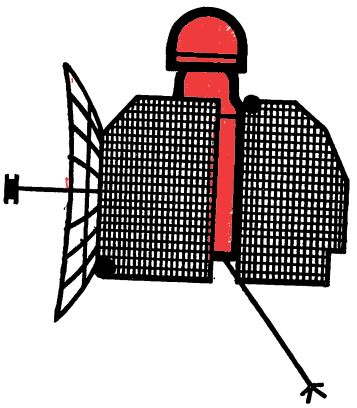


Схема старта космической ракеты с околоземной орбиты.

планеты, да и вес станции был больше — 893,5 *кг*.

Первые космические станции, начавшие исследовать околосолнечное пространство,— это полностью автоматизированные космические роботы. Они умеют регулировать температуру внутри приборных отсеков, разворачиваться и лететь в определенном положении, ориентируясь на Солнце или какую-либо звезду, направлять свои радиоантенны к Земле, а солнечные батареи — к Солнцу. В сторону исследуемой планеты станция направляет объективы

фотоаппаратов и телевизионных камер, антенны радиотелескопов и исследовательских радиолокаторов и щупальца других приборов. Станция может, получив команду с Земли, запомнить ее и выполнить в заданное время. По команде с Земли на расстоянии в сотни миллионов километров на такой станции можно включить реактивный двигатель и тем самым подправить орбиту, чтобы станция подошла ближе к заданной планете.



«Марс-1».

«Марс-1» оснастили обширным комплексом аппаратов. Телевизионное устройство должно было получить снимки с поверхности планеты, спектрорефлексометр — обнаруживать органические покровы, спектрограф — изучить полосы поглощения озона в атмосфере Марса, магнитометры — обнаруживать магнитные поля Марса и измерять магнитные поля в космическом пространстве. Кроме того, на станции были два вида счетчиков космических частиц, радиотелескоп, чтобы изучать космическое радиоизлучение, протонные ловушки и, наконец, датчики для регистрации микрометеоритов.

Корпус станции состоял из двух герметичных отсеков — орбитального и планетного. В первом была аппаратура, работающая во время полета к Марсу; во втором — научные приборы, которые должны были включиться в непосредственной близости от планеты. Автоматическая станция напоминает огромного жука, раскинувшего во все стороны крылья солнечных батарей, усы и зонтики антенн, шары ионных ловушек и трубки магнитометров. Блестят зрачки-объективы фототелевизионной аппаратуры и корпуса других приборов. Этот «жук» ощетинился своими усами сразу же после отделения от ракеты, стартовавшей со спутника.

Наибольшую нагрузку на станции несли приборы орбитального контейнера. Система ориентации обеспечивала такое положение станции, чтобы солнечные батареи все время получали энергию от Солнца.

Сложная жидкостная система терморегулирования состояла из теплообменников, расположенных внутри отсеков, и полушарий-радиаторов вне корпуса станции. Разноцветные полосы полусферических радиаторов — это различные покрытия бачков, по-разному отражающие солнечные лучи, а значит, и по-разному нагреваемые Солнцем. В зависимости от температуры внутри станции нагнеталась из внешних радиаторов во внутренние холодная или теплая жидкость. Переданные из космоса измерения свидетельствовали о том, что в станции поддерживалась практически «комнатная» температура: 20—30°.

Напряженно работал радиокомплекс станции. С Земли шли десятки радиосигналов, которыми последовательно включались те или иные приборы. Три радиопередатчика, работающих в метровом (1,6 *м*), дециметровом (32 *см*) и сантиметровом диапазонах (5 и 8 *см*), сообщали нам о скорости, направлении и местонахождении станции. Сеансы радиосвязи со станцией могли производиться через 2, 5 и 15 суток. Эти интервалы были выбраны с таким расчетом, чтобы обеспечить подзарядку бортовых аккумуляторов от солнечных батарей и чтобы радиосвязь устанавливалась в то время, когда «радиовидимость» станции наилучшая.

Многие сведения, переданные с «Марса-1», по-новому осветили физические процессы, происходящие в околосолнечном пространстве. Некоторые сведения были неожиданными. Отмечен чрезвычайно интенсивный поток солнечных корпускул, как бы порыв «солнечного ветра». Установлено, что несколько возросла интенсивность космического излучения со времени полета лунников. На сравнительно небольшом расстоянии от Земли датчики станции зарегистрировали неоднократные столкновения с микрометеоритами; когда же станция удалилась на несколько сотен тысяч километров, число соударений резко сократилось.

21 марта 1963 г. был проведен очередной сеанс радиосвязи на расстоянии в 106 млн. *км*. Но это был последний сеанс. Станция начала беспорядочно вращаться, и ее антенна не ориентировалась больше на Землю. Как показали расчеты, станция должна была пройти около Марса на расстоянии 193 тыс. *км*. Если бы

# «ЛУНА-9» НА ОКЕАНЕ БУРЬ

События, отмечающие знаменательные этапы космической эры, следуют одно за другим: запуск первого спутника Земли — первой ракеты, преодолевшей земное притяжение и ставшей «планетой» солнечной системы; первый человек, стартовавший на ракете в космос; первая ракета, достигшая Луны; первый человек, вышедший из космического корабля и шагнувший в космос; первая фотография обратной стороны Луны. И, наконец, мягкая посадка станции «Луна-9» на поверхность Луны.

Впервые аппарат, созданный человеком, не только достиг Луны, но и совершил на нее посадку. Впервые на другую планету опустилась автоматическая лаборатория, созданная на Земле, передала научные сведения, полученные непосредственно с лунной поверхности, и сфотографировала детали этой поверхности.

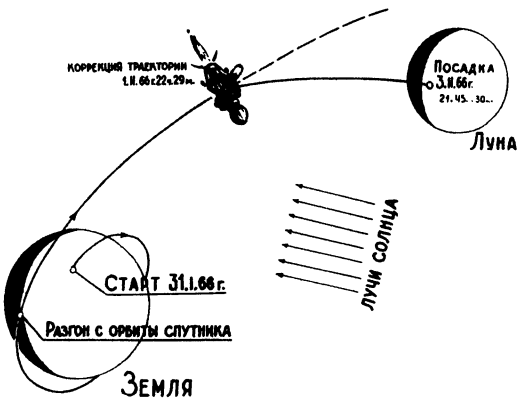



Рис. 1. Схема полета автоматической станции «Луна-9».

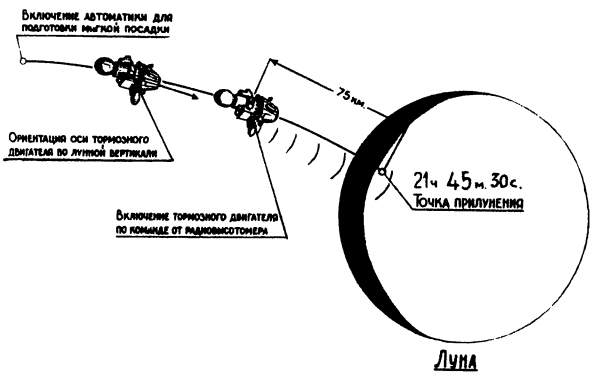


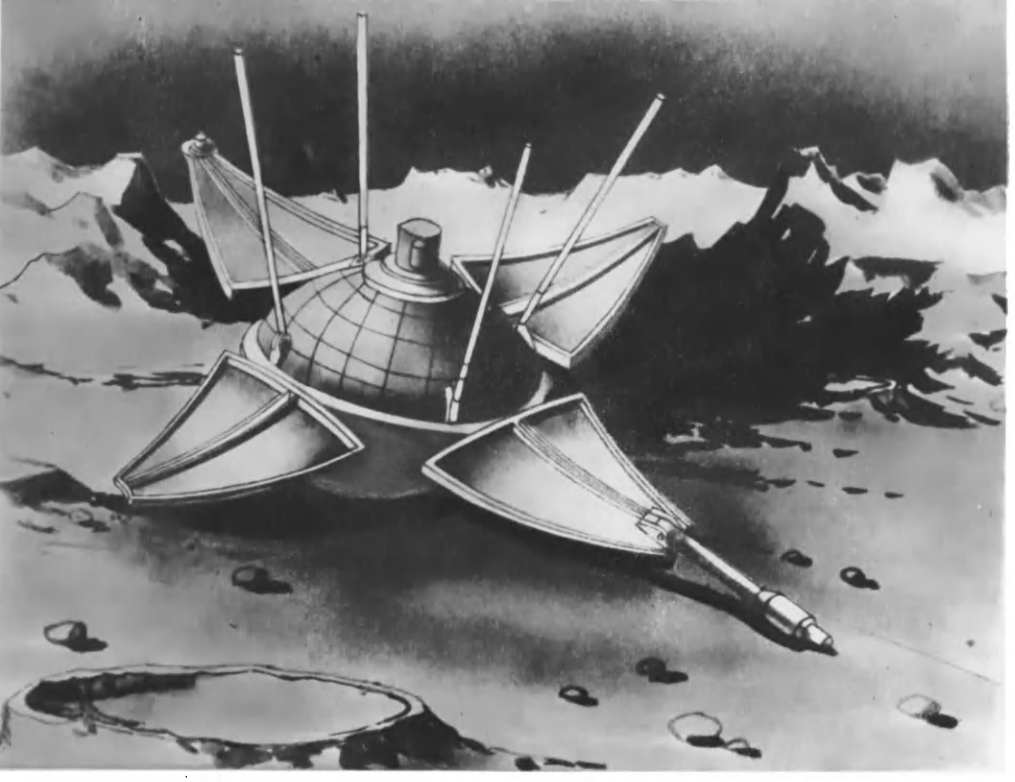

Рис. 2. Схема полета автоматической станции «Луна-9» на участке торможения 3 февраля 1966 г.

На Луне различают два основных типа поверхностных структур: сильно изрезанные кратерами «материки» и сравнительно ровные «моря». Момент для запуска автоматической станции «Луна-9» был приурочен к наступлению лунного утра в типичном для Луны районе — на Океане бурь. Это — крупнейшая равнинная область на видимой части Луны.

Лунное утро обеспечивало наиболее выгодные условия, чтобы распознавать и расшифровывать детали на фотографиях лунной поверхности. Камни и неровности почвы в это время отбрасывают длинные тени. Кроме того, утром на Луне благоприятны и температурные условия: промерзшая за двухнедельную ночь поверхность только что начала отогреваться. Через несколько дней она должна была раскалиться под лучами Солнца более чем до ста градусов.

31 января 1966 г. ракета-носитель вывела автоматическую станцию на орбиту спутника Земли. Радиосигналом был включен ракетный блок, который обеспечил станции разгон с орбиты спутника и выход на траекторию полета к Луне.

С наземных пунктов была измерена траектория полета автоматической станции и установлено, что станция движется по траектории, удаленной от центра Луны на 10 тыс. *км*. Затем были определены величина и направление корректирующего импульса, т. е. было вычислено, на какое время нужно включить ракетный двигатель, находящийся на автоматической станции, и в каком направлении должна действовать тяга этого двигателя, чтобы подправить полет и обеспечить станции встречу с Луной в заданном районе. 1 февраля 1966 г. эти данные, соответствующим образом закодированные, были переданы по радио на борт станции. После радиокоманды с Земли работа всех систем станции проходила автоматически и последовательно по заранее предусмотренной программе, заложенной в бортовую автоматику.



**Автоматическая станция на поверхности Луны (рисунок).**

Сначала станция «нашла» Солнце, затем, не «теряя» его, начала поиск Луны. Когда оптическая система станции «поймала» Луну в свои объективы, автоматика повернула корпус станции так, чтобы ось оптической системы соответствовала данным, полученным с Земли, а сопло двигателя заняло бы нужное положение. После ориентировки была включена двигательная установка, скорость автоматической станции уменьшилась на 71,2 *м/сек*, и она перешла на траекторию, которая практически проходила через расчетную точку в районе Океана бурь.

Новые сеансы измерений позволили уточнить, когда должно начаться торможение. Поправки были введены в систему ориентации и был уточнен момент, когда включить тормозной двигатель. Все эти данные были переданы на борт станции к 16 часам 3 февраля. А примерно за час до сближения с Луной корпус станции был ориентирован так, чтобы сопло двигателя оказалось направленным на Луну, а траектория полета проходила бы точно через центр тяжести Луны. Такое положение станции поддерживалось все время, оставшееся до прилунения.

На высоте около 75 *км* до поверхности Луны, за 48 секунд до посадки, была включена по команде радиовысотомера тормозная двигательная установка. А перед этим от станции были отделены два отсека с аппаратурой, ненужной при посадке, чтобы не тратить горючее на мягкое прилунение лишней тяжести.

Тяга тормозного двигателя затормозила полет станции и снизила ее скорость с 2,6 километра до нескольких метров в секунду. Когда аппарат коснулся поверхности Луны, шарообразная станция вместе с системой амортизации (дополнительно смягчающей удар о почву) была отделена от всей установки и прилунилась отдельно поблизости.

На схеме видны примерные контуры станции «Луна-9». Она состояла из трех основных частей: лунной автоматической станции, двигательной установки и отсеков с приборами. Контейнер яйцеобразной формы, расположенный на стороне, противоположной двигателю, и есть лунная станция. В ее герметичном корпусе размещены приемники и передатчики, система терморегулирования, источники питания, научная аппаратура и автоматическое программно-временное устройство, которое обеспечило в заданной последовательности выполнение всех операций при ориентации и после прилунения. Верхняя часть шара прикрыта четырьмя металлическими «лепестками».

В сложенном виде они образуют замкнутую полусферу, а в раскрытом форма «лепестков» хорошо видна на рисунке.

Шар, отброшенный в сторону в момент соприкосновения двигательного отсека с лунной поверхностью, упал невдалеке. Яйцеобразная форма станции и «лепестки», раскрытые сильными пружинами,— все это обеспечило устойчивое вертикальное положение для объектива телевизионной системы.

Через 4 минуты 10 секунд после прилунения раскрылись антенны станции и начался первый сеанс радиопередачи с поверхности Луны. Радио сообщило, что все системы станции работают нормально и что радиоаппаратура надежно управляется радиокомандами с Земли. 4 февраля в 4 часа 50 минут по московскому времени «Луна-9» по команде с Земли начала обзор лунного ландшафта и передачу его изображения. За трое суток было проведено 7 сеансов радиосвязи общей продолжительностью 8 часов 5 минут.

Телевизионные изображения позволили нам, землянам, рассматривать Луну как бы «стоя на ее поверхности». Объектив телевизионной камеры давал изображение круговой панорамы, т. е. местности вокруг всей станции. Прилунившись на сравнительно пологом склоне, станция оказалась слегка наклоненной. Детали на переднем плане панорамы телевизионная камера просматривала с разрешающей способностью 1:2 *мм*, т. е. различала предметы величиной в несколько миллиметров. О размерах камней и впадин, видимых на снимке, можно судить по кончику «лепестка» на переднем плане снимка. Наружный край этого «лепестка» — 4 *см*. Линия горизонта на снимке очень четкая, без переходов в полутона, так как на Луне практически полностью отсутствует атмосфера и небо там воспринимается как совершенно черное.

Свой первый сеанс станция начала сразу же после восхода Солнца, когда его высота была всего лишь 7 градусов. Поэтому все выступы, камни и бугорки отбрасывали длинные тени, примерно в десять раз превышающие высоту предметов. При втором сеансе длина теней уменьшилась вдвое, а 5 февраля Солнце находилось уже на высоте в 27 градусов и длина теней сократилась в четыре раза по сравнению с первым сеансом. Таким образом была получена серия фотографий одних и тех же

**Фотографический снимок поверхности Луны, сделанный телеобъективом автоматической станции «Луна-9».**

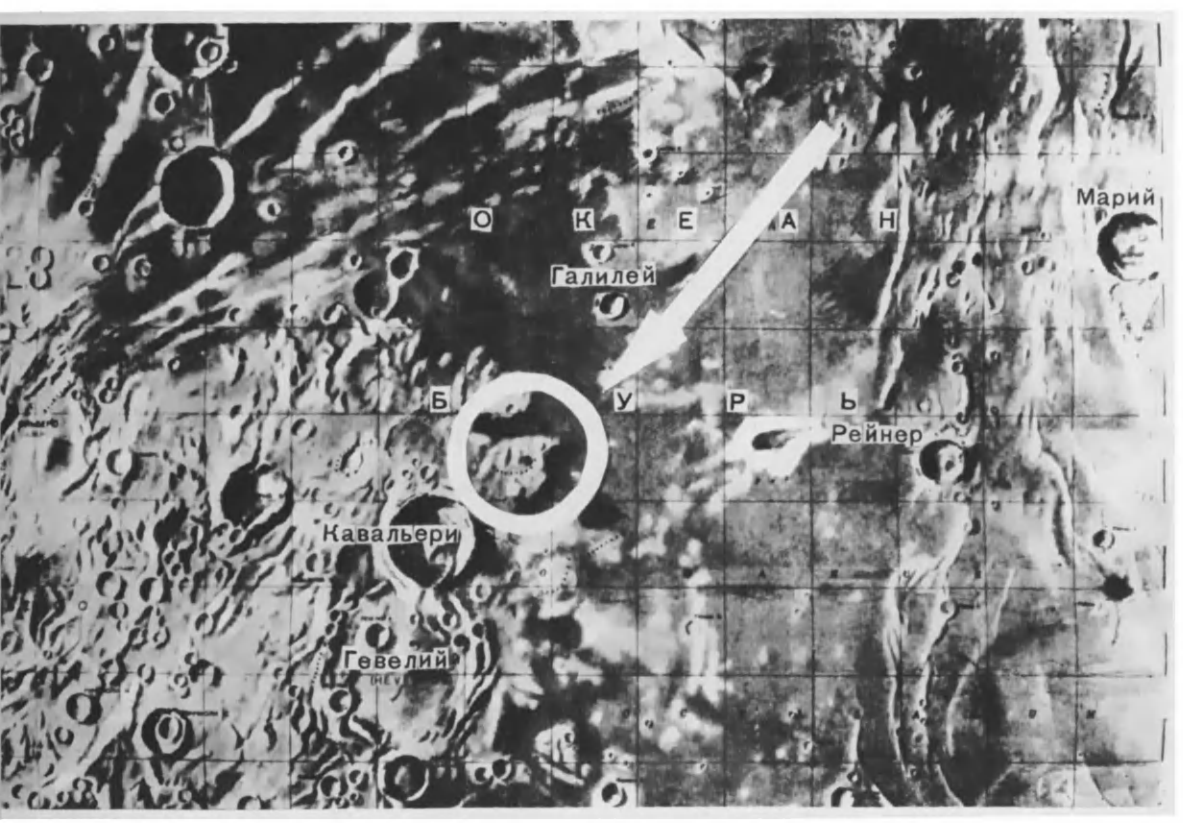
участков лунной поверхности, но при разной высоте Солнца. И это предоставило ученым возможность детально изучить структуру лунной поверхности.

Анализ снимков показал, что поверхность Луны очень шероховата, она покрыта бугорками и углублениями, и на ней разбросаны редкие отдельные камни. Некоторые из этих камней хорошо видны на снимках. Один из них находится рядом со станцией. Его величина около 15 *см*. Несколько далее видны небольшие впадины шириной от десятка сантиметров до нескольких метров. В районе обзора «Луны-9» нет ни больших кратеров, ни гор, только на горизонте заметны невысокие холмы. Тщательное изучение снимков дало астрономам богатейший материал, чтобы уточнить, какова структура поверхностного слоя Луны.

Один из важнейших результатов рейса «Луны-9» — это успешное прилунение аппарата весом в 100 *кг* без заметного погружения в грунт. Это убедительно свидетельствует, что посадка космического корабля на лунную поверхность возможна. Представления писателей-фантастов и многих ученых о том, что Луна покрыта зыбкой, всепоглощающей толщей пыли, оказались несостоятельными.

Прилунение советского космического аппарата открыло новый этап в развитии космонавтики. Оно вселило уверенность в том, что полет человека на Луну будет совершен в очень близком будущем. Человек начал осваивать ближайшие к Земле планеты.

*Схемы, рисунок и фотографии взяты из № 37(17354) газеты «Правда» от 6 февраля 1966 г*

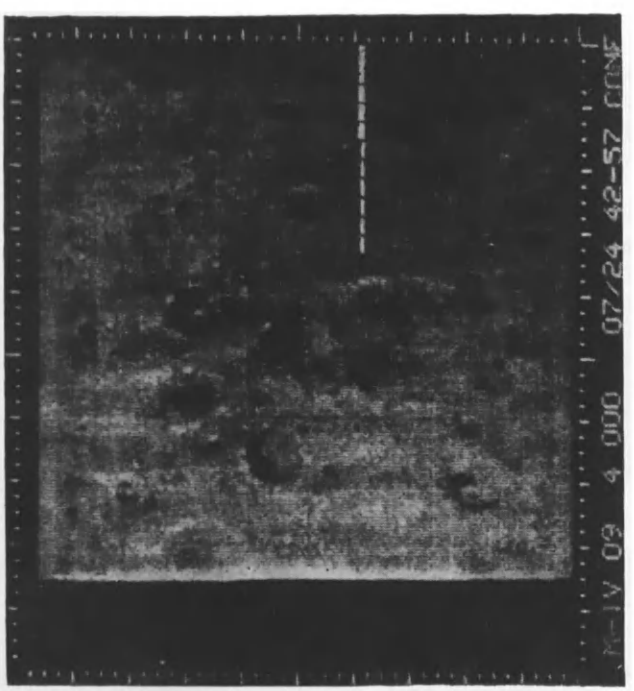



**Район посадки станции «Луна-9». Стрелкой указано место прилунения.**

система ориентации работала нормально, полет станции был бы подправлен ракетным двигателем.

Одновременно с советской ракетой, идущей к Марсу, двигалась к Венере американская ракета **«Маринер-II»**. Это был космический автомат такого же типа, и предназначался он для решения тех же проблем. Когда еще работал двигатель последней ступени, ракета неожиданно начала вращаться, приобрела лишнюю скорость и отклонилась от курса. Но американским ученым удалось на расстоянии 2,4 млн. *км* включить корректирующий двигатель и подправить полет; «Маринер-II» прошел в 37 000 *км* от Венеры и передал на Землю результаты научных измерений.

В США в конце ноября 1964 г. запустили в сторону Марса автоматическую станцию «Маринер-IV». Ориентиром служила ей звезда Канопус. В работе системы астроориентации возникли серьезные неполадки: система «хваталась» за звезды менее яркие, чем Канопус. Кроме того, несколько раз система ориентации начинала повторный поиск звезды. По предположениям ученых это происходило из-за того, что микрометеориты выбивали из корпуса станции мельчайшую металлическую пыль. Светясь в солнечных лучах, эта пыль давала яркие вспышки, которые



**Снимок поверхности планеты Марс, сделанный автоматической станцией «Маринер-IV».**

**На земной наблюдательной станции. На электронно-счетной машине рассчитывают орбиту космической автоматической станции.**

заставляли срабатывать систему ориентации. Радиокомандами с Земли удалось исключить влияние этих факторов и заставить автоматы «ухватиться» за нужную звезду.

В середине июля 1965 г. космический аппарат прошел примерно в 10 тыс. *км* от Марса, провел ряд физических измерений и сфотографировал загадочную планету.

Десять дней «Маринер-IV» передавал по радио 21 снимок планеты. Передача каждого из них шла 8 часов 20 минут. Фотографии поверхности Марса показали, что ее структура весьма схожа с лунной. Знаменитые марсианские «каналы» пока не обнаружены. Научные приборы передали, что, как и у Луны, у Марса нет заметного магнитного поля, нет и поясов радиации. Не обнаружены также у Марса и новые спутники, кроме известных Деймоса и Фобоса.

За 228 дней полета было зарегистрировано 10 солнечных вспышек, а в корпус станции ударились 190 метеоритов. Все это говорит о том, что полет человека к Марсу неизмеримо сложнее, чем полет к Луне, в котором можно руководствоваться прогнозами и выбрать период, свободный от солнечных вспышек. Вероятность встреч же с метеоритами за несколько дней полета весьма мала.

12 и 16 ноября 1965 г. в СССР были запущены в сторону Венеры две АМС — **«Венера-2»** и **«Венера-3»**. Аппаратура станций была предназначена для широких научных исследований в космическом пространстве, особенно вблизи Венеры. Конструкция и состав аппаратуры обеих АМС различались незначительно.

## ОБОРУДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ

Основная часть научной аппаратуры на космических ракетах и спутниках размещается в отсеках и контейнерах, расположенных внутри герметичного корпуса. Здесь же находятся и радиопередатчики, которые передают на Землю данные научных измерений. Они же контролируют положение ракеты, давление и температуру внутри контейнера и на его поверхности. Внутри корпуса находится и аппаратура для изучения газового состава среды в межпланетном пространстве. Протонные же ловушки этой аппаратуры размещены на поверхности внешней стороны оболочки. Вне корпуса установлены также счетчики космических лучей и «чувствующие» элементы аппаратуры, измеряющей магнитное поле. Эти элементы расположены на конце длинной алюминиевой трубки чтобы исключить влияние магнитной массы контейнера.

Физики уже давно доказали, что космические лучи — это не лучи и не электромагнитные волны, а поток заряженных частиц с самыми различными энергиями, намного превосходящими энергию частиц разогнанных даже в мощнейших ускорителях.

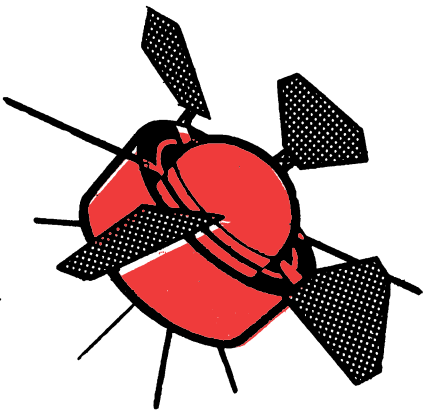
На советских космических ракетах были установлены разнообразные приборы, позволяющие всесторонне изучать состав космических лучей в межпланетном пространстве. Эти приборы делятся на две группы: газоразрядные счетчики космических частиц и люминесцирующие кристаллы с фотоумножителями — сцинтилляционные счетчики.

**Газоразрядные счетчики** — это обычно небольшие стеклянные трубочки, наполненные смесью газов. Внутри каждой из них натянута проволочная нить, а поверхность стекла покрыта проводящим слоем. Это катод. Между нитью и катодом подают напряжение в несколько тысяч вольт, и в трубочках образуется сильное электрическое поле.

Заряженная космическая частица, попадая в счетчик, ионизирует молекулы газа, разбивает их на электроны и положительные ионы, которые разгоняются электрическим полем и в свою очередь ионизируют другие молекулы. Так образуется лавина заряженных частиц, возникает импульс тока.

Радиосхемы усиливают эти импульсы во много раз и с помощью телеметрического устройства передают их на Землю. Сигнал на Землю идет лишь в том случае, когда через счетчики пройдет определенное количество импульсов. Поэтому легко подсчитать и число космических частиц, пронизывающих определенную площадь за секунду, т. е. узнать интенсивность космических лучей.

Работа другой группы приборов — **сцинтилляционных счетчиков** — основана на том, что частицы, летящие с космическими скоростями, при прохождении через кристаллы некоторых веществ вызывают в них вспышку света. Эту



«Протон-1»

вспышку улавливают фотоэлементы — электровакуумные приборы способные «поймать» даже ничтожное количество лучистой энергии. Фотоумножитель «умножает» в несколько миллионов раз слабую вспышку света и создает ощутимый импульс тока.

Чтобы изучить процентный состав частиц с различными энергиями, устанавливают три «барьера». Через самый низкий проходят импульсы от слабых частиц, через средний — от более энергичных, через самый высокий — от самых быстрых частиц, в том числе и импульсы от частиц, летящих почти со скоростью света.

После усиления сигналы поступают в блоки радиотелеметрии и передаются на Землю. Подсчитав число импульсов на разных уровнях, ученые устанавливают, в какой пропорции находятся в космическом излучении частицы с различными энергиями.

Кроме частиц межзвездного газа, в межпланетном пространстве двигаются потоки частиц, излучаемых Солнцем. Для их изучения на ракетах устанавливают **протонные ловушки.** Каждая ловушка состоит из трех полусферических электродов. Два внешних электрода сделаны из металлической сетки, а внутренний — сплошной; он служит коллектором, собирателем протонов. Чем больше протонов попадает

в ловушку, тем больший ток течет через ее коллектор.

Над поверхностью контейнера первой советской космической ракеты находились четыре ловушки. Две из них собирали все протоны межзвездного газа, а две другие улавливали только протоны с большой энергией, летящие от Солнца.

Для исследования метеоритного вещества были установлены на космических ракетах **баллистические пьезоэлектрические датчики.** Что такое пьезодатчик?

Некоторые кристаллы обладают так называемым пьезоэффектом: при сжимании, растягивании или ударе на гранях кристалла возникают электрические заряды. Метеоритная частица ударяется в поверхность пьезодатчика, и на нем появляется электрический импульс, величина которого зависит от массы и скорости частицы. После усиления импульсы разделяются по величине на три «сорта». О числе импульсов каждого «сорта» сообщается на Землю.

Подробное исследование метеоритных частиц проводят американские ученые. Для этого служат специальные спутники **«Пегас-1»** и **«Пегас-II»**, с огромными крыльями-створками. При старте эти крылья были сложены «гармошкой», а в космосе развернулись на полный размах — 30 *м*. На крыльях множество датчиков, которые обнаруживают метеоритные частицы.

Каждый датчик — это заряженный электрический конденсатор, между пластинами которого проложен специальный материал. Если метеоритная частица пробьет конденсатор, прокладка между пластинами в этом месте мгновенно испарится.

Облачко ионизированного газа замкнет обкладки конденсатора, и он разрядится. Импульс тока отметит попадание частицы.

Электро- и радиосистемы «Пегаса» рассчитаны на действие в течение года. Но американские инженеры предполагают, что через несколько лет, когда будет отработана техника сближения космических аппаратов, удастся подвести к «Пегасу» корабль, сложить его крылья и спустить на Землю для тщательного изучения.

Продолжая научные эксперименты в космосе, советские ученые создали уникальную космическую станцию **«Протон-1»** весом в 12,2 *т*. 16 июля 1965 г. эту станцию вывела в космос ракета-носитель мощностью свыше 60 млн. лошадиных сил (свыше 44 млн. *квт*).

Большие размеры станции позволили разместить в ней приборы для исследования космических лучей со сверхвысокими энергиями. Для изучения частиц с энергиями в $10^{11}$—$10^{15}$ электрон-вольт вес спутника должен быть более 10 *т*, так как основная деталь служащей для этого аппаратуры — **ионизационный калориметр** — состоит из большого количества стальных плит. Между ними расположены пластмассовые **сцинтилляторы** (см. ст. «Как видят невидимое»). И чем выше энергия изучаемых частиц, тем больше должно быть в калориметре стальных плит.

Проходя сквозь стальную пластину, частица сталкивается с ядрами железа и рождает вторичные частицы, которые в свою очередь рождают частицы следующих поколений. В результате вся энергия первичной частицы переходит к большему числу вторичных частиц, которые поглощаются в толще ионизационного калориметра.

Поглощение энергии сопровождается световыми вспышками в сцинтилляторах. Чем больше энергия первичной частицы, тем ярче эти световые вспышки. Вспышки регистрируются электронными фотоумножителями, импульсы тока от них измеряются, и результаты передаются по радио на Землю.

Кроме устройства для измерения заряда частиц, на космической станции «Протон-1» установлена аппаратура для измерения энергии электронов, регистрации гамма-квантов, изучения энергетического спектра и химического состава космических лучей солнечного происхождения и для решения ряда других задач. Такое же оборудование установлено на космической станции «Протон-2», запущенной в конце того же года.

Тяжелые спутники типа «Протон» необходимы, чтобы проникнуть в структуру элементарных частиц. Для подобных исследований в земных условиях нужны мощнейшие ускорители частиц. Современный, еще не достигнутый предел таких ускорителей ограничивается мощностью в $10^{12}$ электрон вольт. Но ученые и инженеры блестяще обошли этот предел — они вывели приборы туда, где работают природные «ускорители» — в космос.

## НА КОСМОДРОМЕ

Люди бережно хранят имена героев и даты великих событий, которыми гордится все человечество. Немногие подвиги, совершенные людьми за тысячелетия, оставят такой глу-

бокий след, как первый полет человека в космос.

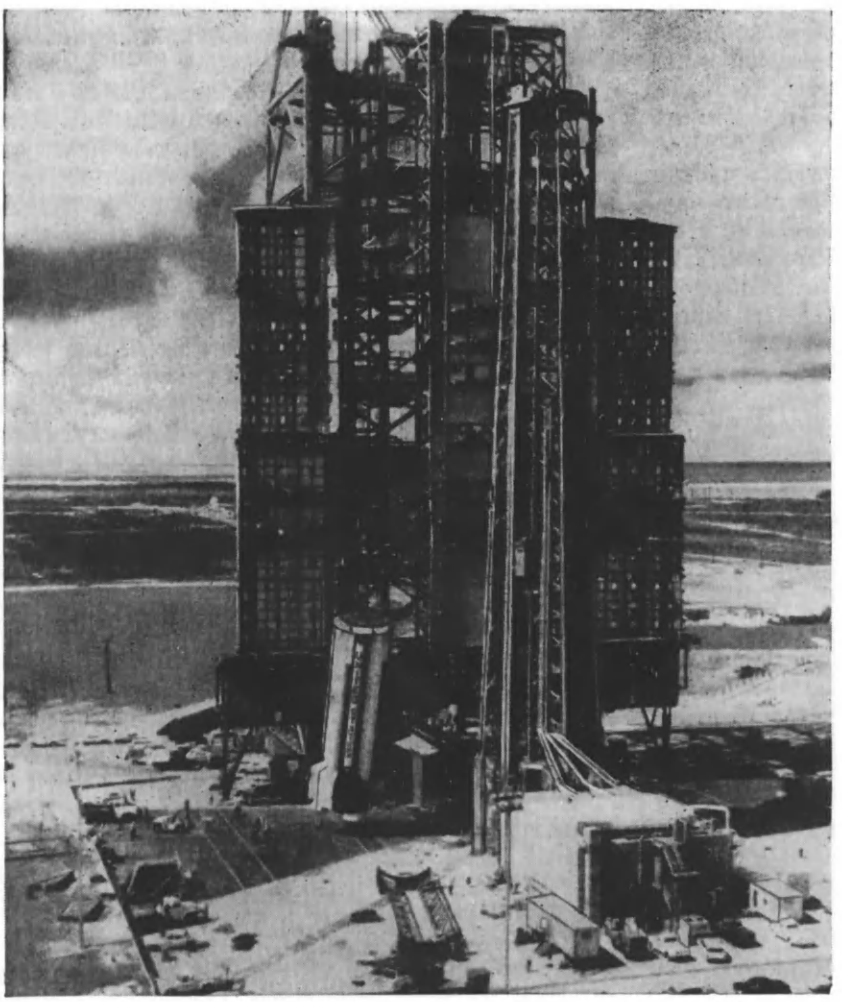
12 апреля 1961 г. с космодрома Байконур стартовал первый космонавт человечества Юрий Гагарин.

Могучая советская ракета вывела на орбиту вокруг Земли первый космический корабль, пилотируемый человеком.

Вслед за Гагариным, сделавшим виток вокруг нашей планеты на корабле **«Восток»**, стартовали другие советские космонавты, увеличивая от полета к полету время пребывания на орбите. С каждым полетом все совершеннее становилось оборудование кораблей, усложнялись научные наблюдения, проводимые космонавтами в полете. Гагарин и Титов летали в одиночку, Николаев и Попович, Быковский и Терешкова совершили групповые полеты, а Комаров, Феоктистов и Егоров летели в трехместном космическом корабле.

Гагарин вел первый телефонный разговор из космоса. На корабле «Восток-2» испытывалась высококачественная телевизионная система, а с последующих кораблей изображения космонавтов транслировались на весь мир.

Космодром Байконур раскинул свои службы на просторах южной степи. Сердце космодрома — стартовая площадка. На некотором удалении от нее — командный пункт, расположенный в защитном железобетонном бункере. Оттуда ведется дистанционное управление стартом и наблюдение (через перископы) за первыми секундами полета. Еще дальше отнесены открытые наблюдательные пункты, монтажный корпус, служебные здания, жилые домики.



**Общий вид стартовой площадки на одном из американских ракетодромов. Идет сборка ракеты.**

В монтажном корпусе ведется сборка ракеты, здесь же соединяют космический корабль с последней ступенью ракеты-носителя. Могучий кран легко поднимает многотонный корабль, и крановщик точно подводит его к ракете. Надежно затянуты крепежные болты — корабль занял свое место. Последним закрепляется защитный колпак. Сборка закончена.

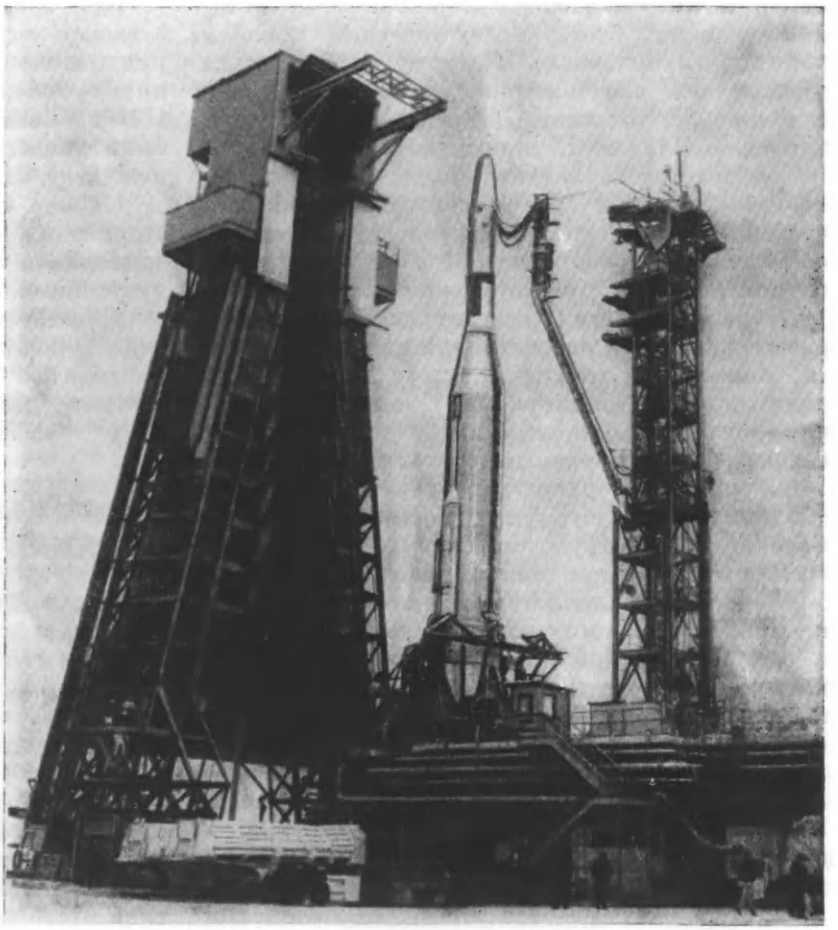
Нажатием кнопки раздвигаются в сторону ворота, и ракета с кораблем выезжает из монтажного корпуса. Электровоз медленно тянет «космический поезд». Вот и стартовая площадка. Ракета уже стоит на своем «рабочем месте», ее стройный сверкающий корпус серебряной свечой устремлен в небо.

Перед полетом все системы ракеты подвергают тщательной проверке. Государственная комиссия слушает доклад генерального конструктора о готовности техники и утверждает командира корабля и его дублера, который займет место в кабине, если первый пилот внезапно заболеет.

За полтора-два часа до старта проводится последний медицинский осмотр космонавта. Его облачают в космические «доспехи».

На космонавта надевают датчики, которые будут регистрировать температуру, пульс, ритм дыхания, снимать кардиограмму сердца и другие данные о состоянии организма в полете. Затем надевается теплозащитная одежда, в которую вмонтирована система вентиляции. В кармашках этой одежды устанавливают усилители сигналов, поступающих с медицинских датчиков. После этого надевается прочная серо-голубая герметическая оболочка. Это основа скафандра, она сшита из прочного и эластичного лавсана. Сверху натягивается оранжевый комбинезон с карманами, гермошлем, перчатки — космонавт готов.

Автобус быстро доставляет космонавта и его дублера к стартовой площадке. Космонавт направляется к председателю Государственной комиссии. Короткий рапорт, прощание с друзьями. Поднявшись по небольшой лесенке к площадке у лифта, космонавт еще раз приветствует провожающих и проходит в лифт. Мимо ажурных металлических конструкций плавно ползет кабина к самой вершине ракеты. Люк корабля открыт. Космонавт занимает свое место.



**На одном из американских ракетодромов. Сборка ракеты закончена; фермы обслуживания отъехали по рельсам, идет последняя проверка аппаратуры через кабель, подведенный к последней ступени ракеты.**

На командном пункте за толстыми стенами бункера прохладно. В операторской сотни приборов непрерывно сообщают о самочувствии космонавта, о состоянии устройств ракеты-носителя и космического корабля. Объявлена «пятиминутная готовность». Это значит, что еще раз проверены все устройства, космонавт к полету готов и до старта осталось 5 минут.

У одного из перископов, нацеленных на ракету, заместитель генерального конструктора. Справа от него огромный хронометр, ведущий точный счет секундам. Около хронометра лист с предписанием о точном времени старта.

И вот нажата кнопка, дающая волю 20 млн. лошадиных сил. Сразу доносится гром работающих двигателей. Дрожат стены бункера. Плавно поднявшись, огромная ракета быстро набирает скорость, и вот уже исчезла яркая точка, растаяв в бездонной небесной синеве.

Проходит 15—20 минут, и космонавт радирует: «Чувствую себя хорошо. Вижу Землю!»

После старта на космодроме вступает в жизнь новый график работы. Он подчинен теперь другой задаче — следить за полетом корабля и состоянием космонавта. На командном пункте дежурят оперативные группы Государственной комиссии. Каждая группа докладывает комиссии о том, как протекает полет.

## УСТРОЙСТВО КОРАБЛЯ «ВОСТОК»

Опыт, накопленный советскими учеными и конструкторами при запусках спутников, лун-

ников и автоматических межпланетных станций, позволил создать космический корабль для полета человека. В марте 1961 г. были произведены два последних контрольных пуска корабля «Восток». В кресле пилота сидел манекен, облаченный в космический скафандр. Кроме того, в кабине находились собаки. Оба полета прошли в точном соответствии с программой и подтвердили высокую надежность конструкции и всех систем, а также полную безопасность полета для человека.

Корабль «Восток» состоит из кабины сферической формы, рассчитанной на одного пилота, приборного отсека и отсека с тормозной двигательной установкой. После выведения на орбиту корабль-спутник отделяется от последней ступени ракеты-носителя.

Внешняя поверхность кабины покрыта слоем тепловой защиты, предохраняющим ее от высокой температуры, которая развивается от трения при спуске в плотных слоях атмосферы.

Через три иллюминатора с толстыми жаропрочными стеклами космонавт видит Землю и звезды, фотографирует. Наблюдая за линией горизонта и направлением «бега» поверхности Земли, космонавт может ориентировать корабль в пространстве с помощью двигателей системы ориентации. Для предохранения глаз от лучей Солнца, которое, по словам Гагарина, настолько ярко, что на него нельзя смотреть даже зажмурившись, иллюминаторы снабжены шторками.

Кресло пилота — это и его рабочее место, и своеобразный домик, в котором есть все для жизненных нужд. В кресле находится запас кислорода и вентилирующее устройство для отвода тепла из скафандра. В кресле размещены приемо-передающие радиостанции, запас продуктов и предметов первой необходимости, которые могут понадобиться после приземления. Поверхность кресла точно соответствует форме тела космонавта и выложена мягкими пластмассовыми подушками.

При аварийной ситуации на старте или в процессе вывода на орбиту кресло с космонавтом автоматически катапультируется через люк, быстро открывающийся в корпусе кабины. Парашютные системы кресла обеспечивают плавный спуск на землю или воду. При спуске на воду автоматически разворачивается надувная лодка. Но и без нее поддерживать космонавта на воде может скафандр. Теплоизоляция скафандра и его герметичность таковы, что космонавт не ощутит холод, даже находясь 12 часов в ледяной воде.

При возвращении на Землю совсем не обязательно отделяться от корабля катапультируясь и спускаться на парашюте. Система механизмов обеспечивает безопасное приземление всей кабины корабля «Восток». Оба эти способа были успешно опробованы при запуске тяжелых кораблей-спутников.

Кабина корабля «Восток» значительно просторнее кабины пилота на современном военном самолете. У космонавта, пристегнутого к креслу ремнями, удобный доступ ко всем приборам: он может вести наблюдения через иллюминаторы, поддерживать радиосвязь с Землей, управлять ориентацией корабля, включать систему приземления, регулировать температуру в кабине и т. п.

## МНОГОМЕСТНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ «ВОСХОД»

12 октября 1964 г. ракета-носитель вывела в космический орбитальный полет советский трехместный корабль «Восход». Это был первый в истории покорения космоса многоместный космический корабль. От полетов мужественных одиночек советские космонавты перешли к коллективным полетам специалистов разных профессий. Экипаж корабля состоял из командира корабля летчика-космонавта Владимира Михайловича Комарова, научного работника кандидата технических наук Константина Петровича Феоктистова и врача Бориса Борисовича Егорова.

В новом корабле уже можно различить черты будущих космических лабораторий и космических стратопланов. Если в нем пока еще не очень просторно, нельзя, например, ходить, нет спальных мест и письменных столов, то нет уже и катапультируемых кресел и космонавты не одеты в стесняющие движения скафандры...

Три специалиста разных профилей вели одновременно комплексные физико-технические и медико-биологические исследования, помогая и дополняя друг друга

Врач проверял на себе действие невесомости и сравнивал свои впечатления с ощущениями других членов экипажа; ученый наблюдал за горизонтом, полярным сиянием, светящимися частицами за окнами иллюминаторов; а командир экипажа оценивал управляемость корабля, проверял ориентировку по звездам и наблюдал ориентиры на Земле. Все трое могли проверить и сравнить свои впечатления, обменяться мне-

ниями, посоветоваться друг с другом и, наконец, поспорить.

Сбор научной информации в космосе не прекращался ни на минуту. Их предшественники вынуждены были часть времени в полете тратить на сон, на прием пищи и прерывать исследования. А на «Восходе» постоянно работали два члена экипажа, а один отдыхал. За сутки полета ракета сделала 16 витков вокруг Земли, и трое космонавтов провели обширные наблюдения и даже исследования.

Программа полета полностью выполнена. Испытаны конструкция и эксплуатационные характеристики нового пилотируемого корабля, его системы и оборудование; исследованы работоспособность и взаимодействие в полете группы космонавтов; проверены в полете их режим труда и отдыха и взаимозаменяемость на некоторых этапах полета; проведены научные исследования в условиях длительного космического полета; продолжено изучение, как влияют различные факторы космического полета на человеческий организм.

На корабле «Восход» было установлено новое, более совершенное и разнообразное оборудование. Кроме использовавшихся ранее систем ориентации, была применена новая, позволяющая точно определять расположение корабля в пространстве и уточнять положение его относительно поверхности Земли. Космонавты располагали многочисленными средствами радиосвязи и новой, более совершенной системой телевидения.

От всех своих предшественников «Восход» качественно отличался принципиально новой системой мягкой посадки. Самый трудный участок полета — спуск и приземление — перестал быть трудным. Многотонный корабль коснулся земли практически с нулевой скоростью, т. е. повис в воздухе, как вертолет, и неслышно опустился на поверхность Земли. Именно так рисуют обычно писатели-фантасты посадку ракетопланов в грядущих веках на неведомые планеты. Далекие, казалось бы, мечты о комфортабельном космическом полете советские ученые и инженеры уже сегодня воплотили в жизнь.

Старт «Восхода» ощущался космонавтами также намного более мягким и спокойным, чем в предыдущих ракетах. Вот как описывает его К. П. Феоктистов: «Шум не слишком сильный (сравним с шумом в кабине современного реактивного самолета); вибрации не слишком большие; легкое покачивание ракеты, напоминающее покачивание поезда в пути; легкопереносящиеся перегрузки. К концу работы каждой ступени они увеличиваются и в начале работы последующей падают почти до обычного уровня. В общем, полет на ракете переносится легко».

Создание корабля «Восход» впервые показало, что космический многоместный корабль-стратоплан — орбитальный корабль-лаборатория, на котором выйдут в космос «обычные» люди, космонавты-пассажиры, космонавты-ученые и космонавты-строители,— дело ближайшего будущего.

## ЗА БОРТОМ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ

Выделяя основные вехи освоения космоса человеком, многие ученые в один ряд с запуском первого советского спутника и полетом Ю. А. Гагарина ставят выход человека из кабины корабля в космическое пространство. Этот эксперимент подтвердил, что стало возможным активное пребывание человека в открытом космосе — пересадка с корабля на корабль, монтажные работы при сборке лабораторий и орбитальных станций и, конечно, выход на поверхность других планет и Луны. Человек перестал быть пленником космической ракеты.

Этот замечательный полет начался 18 марта 1965 г. Двухместный космический корабль **«Восход-2»** вышел на орбиту вокруг Земли, имея задание провести новый эксперимент — выход человека из корабля в космическое пространство. Командир корабля Павел Иванович Беляев и летчик-космонавт Алексей Архинович Леонов прошли специальную тренировку, до автоматизма отработали взаимодействие друг с другом, особенно на самых ответственных этапах — в момент выхода в космос и возвращения обратно в корабль.

Выход космонавта похож на выход водолаза из подводной лодки. Сначала человек, одев скафандр, из основного отсека переходит во вспомогательную камеру — шлюз — и закрывает входной люк. В подводной лодке после этого в шлюз постепенно напускают воду, а в космосе — выпускают, «стравливают» воздух, т. е. образуют в шлюзе вакуум. И в том и в другом случае шлюз заполняется той средой, которая окружает корабль. Выравнив давление, можно открывать выходной люк шлюза. Когда «Восход-2», совершая второй виток, пролетал на высоте 460 *км* над Черным морем, Леонов

вошел в шлюз. Конечно, космонавт чувствует себя иначе, чем моряк в подводной лодке. Леонов не вошел, а, паря в невесомости, «вплыл» в шлюзовую камеру. Дав давление в скафандр, космонавт проверил его герметичность и подачу кислорода. Затем он проверил положение светофильтра на гермошлеме. Это было необходимо: когда командир корабля открыл крышку выходного люка, ослепительно яркий солнечный свет заполнил камеру.

Выбравшись из люка, Леонов легким толчком отделился от корабля и плавно отплыл в сторону на длину троса-фала, соединявшего его с кораблем. Медленно вращаясь, человек, впервые оказавшийся лицом к лицу с бесконечной Вселенной, с восторгом осматривался вокруг. Как и предсказывали ученые, как многократно описывали писатели-фантасты, яркое солнце и немигающие звезды сияли на «фоне темно-фиолетового с переходом в бархатную черноту бездонного неба...». Космонавт отчетливо различал очертания Крымского побережья, голубую линию Волги, хребет Урала, Обь, Енисей — огромная красочная карта нашей планеты медленно открывалась его взору.

Выполняя программу, Леонов совершал различные эволюции: разбросав руки, парил в космосе, подтягивался за трос к кораблю и отталкивался от него.

Перед возвращением на корабль космонавт снял с кронштейна киноаппарат, намотал на руку фал и вошел в шлюз. Командир закрыл люк, выравнил давление в шлюзе и кабине, и Леонов снова оказался в своем кресле.

Какие же основные физические особенности пребывания в космосе удалось наблюдать в этом полете?

Два небесных тела — корабль и человек — это такая же планетная система, как, например, Земля — Луна, и так же подчиняются законам космической механики. Они движутся по своим орбитам, вращаясь вокруг общего центра масс. Этот центр всегда остается на орбите, предназначенной кораблю. Но массы корабля и человека сравнительно ненамного отличаются друг от друга, значительно менее, чем, скажем, Земля и Луна. Поэтому, когда космонавт отталкивался от корабля, было заметно, что и корабль «отталкивается» от космонавта — любое перемещение Леонова вызывало соответствующее перемещение корабля. Леонов, рассказывая о своих впечатлениях, подчеркивал, что очень заметно ощущение упругости при отталкивании от корабля — при толчке космонавт чувствует, как весь корабль мягко отходит в противоположную сторону.

Интересно также, что при малейшем смещении направления силы толчка космонавт начинал вращаться вокруг своей собственной оси. Остановить вращение какими-либо движениями невозможно, так как для этого нужно от чего-то оттолкнуться, куда-то приложить силу, а точки опоры нет. Единственный выход — использовать реактивную силу. В будущем для стабилизации своего положения вне корабля космонавтам, очевидно, придется прибегать к крошечным реактивным двигателям, или, как пишут фантасты, к реактивным пистолетам.

При перемещениях в невесомости крайне необходимо соразмерять и силу толчков. Вот что, например, рассказал Леонов: «Я довольно энергично подтянулся за фал и был вынужден руками обороняться от начавшего стремительно надвигаться на меня корабля. Прежде всего подумал о том, как бы не удариться иллюминатором гермошлема о корабль. Но, подлетев к шлюзу, я самортизировал удар руками. Это оказалось очень легко сделать...»

Командир все время наблюдал за действиями Леонова с помощью телевизора, вел с ним телефонный разговор по проводам, проложенным в фале, по приборам в кабине контролировал пульс, дыхание и работу системы жизнеобеспечения. Кроме того, все прикосновения к внешней оболочке корабля хорошо прослушивались внутри. Это использовалось как своеобразная дополнительная система звукового контроля. Звук в космическом вакууме не распространяется, но каждое прикосновение к обшивке корабля отчетливо слышно внутри его. В случае необходимости командир мог прийти на помощь космонавту, находившемуся за бортом корабля.

За выходом Леонова в космос следила вся страна. Телевизионная камера, установленная на внешней поверхности корабля, позволила миллионам людей стать свидетелями космического подвига. Автоматическая кинокамера вела съемку непосредственно в космосе.

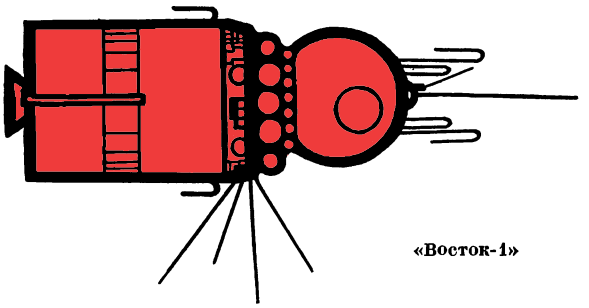
Очень интересно было проверить, можно ли работать за бортом корабля, ведь в будущем предстоят огромные монтажные работы. Леонов подтверждает, что работать в космосе можно: он намотал на руку фал, убрал крышку с объектива киноаппарата, перед возвращением сам снял киноаппарат со стойки и т. п.

Но он отметил, что двигаться и работать в надутом воздухом скафандре трудно. В част-

ности, войти обратно в люк оказалось не таким уж легким делом. Прогулка в космос потребовала значительных физических усилий.

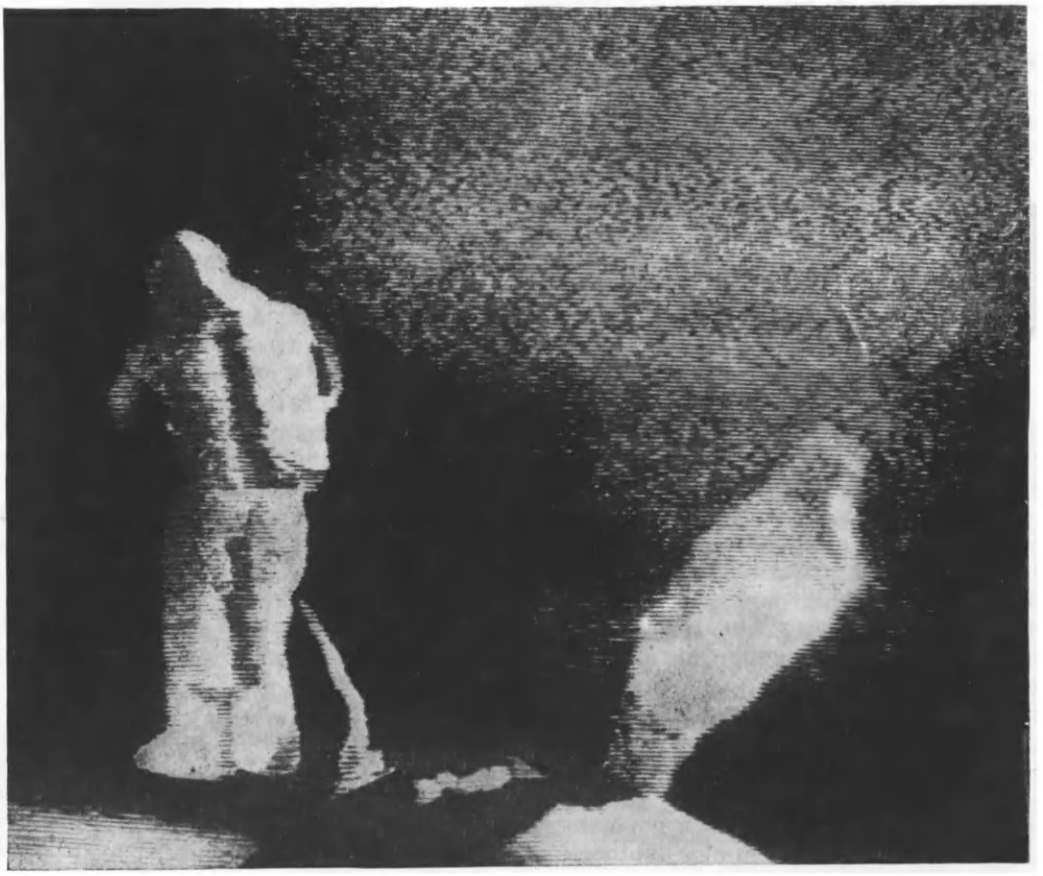
Многих интересует так называемая метеоритная опасность. Ведь Леонов вышел в космос в легком скафандре, а не в рыцарских доспехах. Степень опасности не так уж велика. Подсчитано, что, если стальная броня корабля равна 1,3 *мм*, один поражающий удар метеорита может происходить в среднем в каждые 180 лет. Однако метеоритная опасность увеличивается, если уменьшается толщина защиты.

Поэтому, прежде чем выпустить в космос человека, одетого в легкий скафандр, нужно было детально изучить действие мельчайших метеоритных тел и выбрать соответствующий материал для скафандра. Общая масса микрочастиц, падающих каждую секунду на космонавта, равна всего стомиллиардной доле грамма. Такая бомбардировка, конечно, не опасна. Наши ученые создали условия, при которых кратковременный выход в космос не опаснее городской автомобильной поездки.



«Восток-1»

Гораздо серьезнее **радиационная опасность.** Орбиты космических кораблей пока пролегают ниже земных поясов радиации, и за неделю полета доза облучения (около половины рентгена) не превышает допустимую норму. Однако при ядерных взрывах на Солнце — хромосферных вспышках — космонавт и вблизи Земли может получить смертельную дозу облучения. Например, при одной из мощных вспышек, отмеченных в феврале 1956 г., космонавт получил бы дозу радиации около 10 000 рентген, что в десятки раз превышает смертельную дозу.



**Первые шаги человека в космическом пространстве. Так был виден на экране телевизора выход А. А. Леонова из корабля в космос. Направо от космонавта открытая крышка люка.**

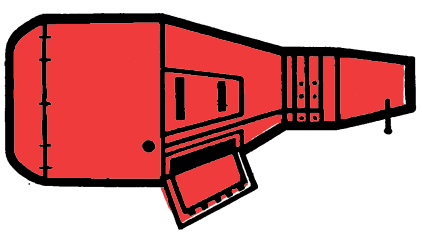
Однако, находясь внутри корабля со стальной стенкой, например, в 18 *мм*, космонавт получил бы около 100 рентген, что не смертельно, но значительно выше допустимой нормы.

Чтобы исключить вероятность чрезмерных облучений, советские ученые разработали методы заблаговременного прогнозирования хромосферных вспышек на Солнце, и это значительно увеличило безопасность полетов.

Через несколько дней после знаменательного полета корабля «Восход-2» мир узнал о значительном успехе американских космонавтов Гриссома и Янга. Американским ученым впервые удалось осуществить полет двухместного корабля, который, сделав 3 витка вокруг Земли, благополучно приводнился в Атлантическом океане.

Через некоторое время после выхода в открытый космос нашего космонавта Леонова, такой же эксперимент удалось повторить и американцам. 3 июня 1965 г. после трех оборотов вокруг Земли американские космонавты Джеймс Макдиватт и Эдвард Уайт, стартовавшие на космическом корабле **«Джеминай-IV»**, открыли люк и Уайт вышел в космос.

По разработанной ранее программе космических исследований в этом полете планировалась только разгерметизация кабины — намечалось открыть люк, проверить действие всех устройств в разреженном пространстве и снова



**«Джеминай-IV»**

закрыть люк. Но успешный выход Леонова рассеял все опасения и позволил сократить программу.

Так же, как и советский космонавт, Уайт был соединен с кораблем гибким фалом длиной в 7,6 *м* и пробыл в космосе около 20 минут. В открытом пространстве Уайт мог перемещаться с помощью реактивного пистолета, которым авторы научно-фантастических романов обычно снабжают космонавтов, ведущих работу в космосе. Пистолет — это маленький реактивный двигатель, в двух баллонах которого размещено «горючее» — сжатый кислород. Открывая клапан, Уайт выпускал струю газа в то или иное сопло и перемещался вместе с пистолетом в сторону, противоположную струе. Уайт отметил, что он очень быстро освоил пистолет и свободно управлял положением своего тела.

Сжатый газ в пистолете американского космонавта быстро кончился (его было всего 600 *г*), и большую часть времени, проведенного в космосе, Уайт перемещался, подтягиваясь за фал.

Макдиватт и Уайт получили для полета весьма обширную программу, но значительную часть ее выполнить не удалось из-за неполадок и неожиданных препятствий. Не удалось выйти на втором витке, не удалось сблизиться с последней ступенью ракеты, не удалось спланировать при входе в атмосферу Земли, и перегрузки доходили до 8 вместо 4—5 *g*.

Во время полета космонавты пережили несколько неприятных минут. После возвращения Уайта в корабль долго не удавалось закрыть люк. Только через 25 минут удалось с этим справиться. От повторного открывания люка на следующем витке пришлось отказаться.

Готовясь к выполнению своей программы полета к Луне, американцы 21 августа 1965 г. вывели в космос корабль той же серии «Джеминай-V». Космонавты Купер и Конрад 8 суток пробыли в космосе, проверяя работу различных устройств корабля, проводя научные и технические эксперименты и измерения. Неполадки в электропитании корабля чуть не прервали этот длительный полет.

Купер и Конрад наблюдали из космоса тропический шторм, разыгравшийся в Тихом океане. Они разглядели авианосец и эсминец, шедшие в один из американских портов на побережье Атлантического океана. По поручению военного министерства они наблюдали и фотографировали запуск баллистической ракеты и провели серию других наблюдений.

Длительность полета — 8 суток — была запланирована не случайно. Это примерно тот срок, который необходим для первого путешествия человека на Луну и обратно. Полет показал, что современный космический корабль с людьми может находиться в космосе длительное время.

## НЕВЕСОМОСТЬ

При длительных полетах, вроде пятидневного полета Валерия Быковского, усидеть в кресле трудно. Да в этом и нет необходимости. Просторная кабина позволяет, отстегнув ремни, выходить из кресла, сделать зарядку и свободно «поплавать» в кабине.

Гагарину еще не разрешали выходить из кресла: было неясно, как отразится длительная невесомость на состоянии человека, сможет ли он снова надежно пристегнуться ремнями к креслу и т. д. Но первые же полеты исключили все сомнения. Николаев и Попович по нескольку раз отстегивались и «плавали» по кабине. К их полетам кабина была несколько перестроена — стало проще и удобнее выходить из кресла.

Космонавты рассказывали, что они с нетерпением ждали этот час, предписанный программой полета, отстегивались, делали зарядку и подолгу парили в невесомости.

Многие устройства в кабине рассчитаны на невесомость. Вся внутренняя поверхность кабины выложена мягким материалом, чтобы оградить выходящего из кресла пилота от ушибов. Все предметы закреплены или помещены в карманы, тюбики и пакеты с пищей уложены в закрытый ящик, а карандаш, которым космонавт вносит записи в бортжурнал, привязан на длинном шнуре.

Валерий Быковский особенно подробно демонстрировал состояние невесомости. На экранах телевизоров весь мир мог видеть, как перед лицом космонавта повисал тюбик с питательным желе, как от толчка пальцем тюбик отправлялся путешествовать по кабине корабля или начинал вращаться.

Но невесомость приводит не только к забавным положениям из-за того, что предметы теряют вес и беспорядочно плавают по кабине. Невесомость накладывает свой отпечаток на работу человеческого организма, на его ощущения, особенно на работу так называемого вестибулярного аппарата.

Этот орган обеспечивает равновесие и вертикальное хождение человека — это как бы датчик вертикали в нашем организме. Работа этого органа определяется воздействием силы тяжести.

Специальные полеты на самолетах, а затем полеты космонавтов показали, что исчезновение тяжести не вызывает неприятные ощущения. Наиболее всесторонние наблюдения велись на корабле «Восход». Каждый человек воспринимает невесомость по-своему. Тщательно анализируя свои ощущения, Егоров и Феоктистов обнаружили, что, когда глаза закрыты, начинает казаться, что ты находишься в перевернутом положении. Егорову, например, казалось, что его лицо направлено вниз, а у Комарова вообще не возникало никаких иллюзий «перевернутого положения». Все трое отмечали, что эти ощущения не были особенно неприятными и появлялись лишь, когда на них сосредоточено внимание. Наблюдая за своими ощущениями, космонавты заметили также, что резкие движения головой вызывают легкое головокружение. Но, во всяком случае, все эти отклонения от нормального состояния не мешали работе.

Интересно, что проверка тонкой координации движений показала, что они совершались без затруднений. Например, почерк в невесомости не изменяется. Работа с любым точнейшим научным прибором, требующим многочисленных манипуляций, не вызывает затруднений. А эти выводы очень важны для будущих длительных полетов целых коллективов ученых, установлено, что можно и в условиях невесомости работать с самыми разнообразными научными приборами.

Врач Егоров провел также и другие специальные медицинские исследования. На борту корабля он брал у космонавтов кровь для последующего анализа на Земле, записывал биотоки головного мозга, регистрировал работоспособность мышц кисти руки, провел наблюдение над состоянием зрения и, что особенно интересно, измерял давление крови. С каждым полетом углубляются исследования, как ведет себя человеческий организм в космическом полете, и с уверенностью можно сказать, что в ближайшем будущем для врачей будет оставаться все меньше и меньше вопросов, связанных с условиями космического полета.

До первых полетов в космос ученым было во многом загадкой, как организовать в состоянии невесомости прием пищи. Было известно, что жидкость либо соберется в шар, либо растечется по стенкам, смачивая их. Можно ли будет пить воду, например, из стакана? Наверняка нет! Кусочки пищи разлетятся по кабине. Особенно опасными казались мелкие крошки: будучи взвешены в воздухе, они могут затруднить дыхание. Поэтому было предложено готовить пищу в виде питательной пасты-паштета, помещать ее в тюбики, из которых космонавт должен выдавливать ее прямо в рот. Воду предлагалось космонавту высасывать из сосуда.

Практика в основном подтвердила эти предположения, но и внесла некоторые существенные поправки. Питаться из тюбиков оказалось удобно, но, соблюдая аккуратность, можно есть пищу и в ее земном виде. Космонавты брали с собой жареное мясо, ломти хлеба. На корабле «Восход» было организовано для эки-

пажа четырехразовое питание. А при полете Быковского телезрители видели, как он ел зеленый лук, пил воду из пластмассового флакончика и с особым удовольствием ел воблу.

Невесомость грозила сильно усложнить процесс дыхания. Высказывалось предположение, что выдыхаемая углекислота будет скапливаться у рта, мешая доступу свежего воздуха. Создатели корабля позаботились о хорошем перемешивании воздуха в кабине. Это нужно для того, чтобы воздух непрерывно поступал в систему регенерации, где он фильтруется и обогащается кислородом, и в систему терморегулирования для охлаждения или подогрева.

При невесомости резко нарушается передача тепла через газовую среду. В земных вентиляционных и отопительных системах теплый воздух, как более легкий, поднимается вверх, а холодный опускается вниз, поэтому и происходит циркуляция воздушной массы. В космосе, где нет ни верха, ни низа и нет веса, циркуляция может быть налажена только принудительным перемешиванием.

## МИКРОКЛИМАТ

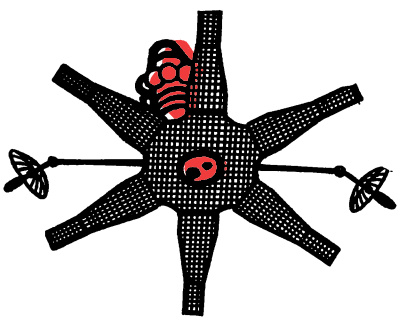
Для нормальной жизнедеятельности космонавту нужен постоянный микроклимат, т. е. постоянные климатические условия, на которые не влияет окружающая ракету среда. С высокой точностью поддерживаются в кабине барометрическое давление, температура, влажность и газовый состав воздушной среды. Система регенерации (восстановления) воздуха поглощает углекислый газ и влагу, выделяющиеся при дыхании, и поддерживает в воздухе постоянное содержание кислорода. На всех кораблях воспроизводилась земная атмосфера, и космонавты чувствовали себя в этом отношении как дома.

## РАДИОСВЯЗЬ

На Земле поддерживается с кораблем четкая, удобная и непрерывная радиосвязь. Чтобы связь была регулярной и днем и ночью и на любом участке полета, в каждой ракете устанавливается несколько приемопередатчиков, работающих на разных волнах. Голос друзей звучит в шлемофонах и в нескольких громкоговорителях. Терешкова и Быковский в полете разговаривали друг с другом. А Комаров, Феоктистов и Егоров уже не нуждались в радиосвязи между собой. Система связи, отработка которой началась еще при пусках кораблей с животными, обеспечила двусторонние радиотелефонные переговоры с Землей и возможность наблюдать за космонавтом в телевизор. Объектив телевизора как бы приближал космонавта к Земле.

Телевизионная система на корабле «Восход» позволяла, кроме того, «смотреть сквозь стенку» кабины. Она обеспечивала обзор окружающего ракету пространства даже через те участки стенки, где нельзя было прорезать обычный иллюминатор,— со стороны приборного отсека, тормозной и двигательной установок. С «Восхода» передавались на Землю по телевидению картины, которые наблюдали космонавты.

Но самые волнующие кадры были переданы при полете «Восхода-2». Телезрители с затаенным дыханием наблюдали за тем, как впервые в космос вышел человек, как он отплыл от корабля, совершал различные движения, парил в космосе и снова вернулся к кораблю...

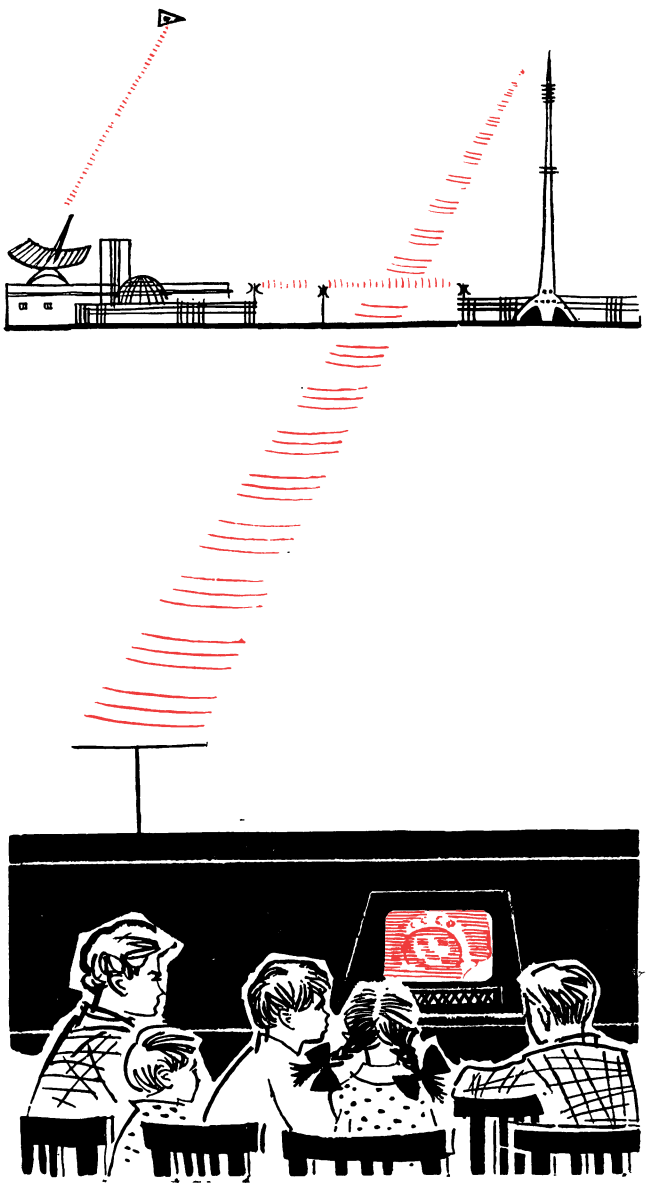


«Молния-1»

С советских космических кораблей впервые в мире была осуществлена передача из космоса движущихся изображений.

На кораблях «Восток» и «Восход» телевизионные системы были значительно усовершенствованы и позволяли вести передачу из космоса через интервидение на всю планету (см. в т. 5 статьи «Телевидение» и «Радиоэлектроника в космосе»).

Космическое телевидение было впервые реализовано в нашей стране запуском спутника-ретранслятора **«Молния-1»**, который вышел в апреле 1965 г. на эллиптическую орбиту с высоким апогеем — 40 тыс. *км*. С помощью телевизионного ретранслятора, установленного на



спутнике, проводилась успешная двухсторонняя передача программ Москва—Владивосток и Владивосток—Москва. В космос на ретранслятор одновременно подавались сигналы с двух наземных передатчиков, и по «радиомосту» осуществлялось как бы «двухстороннее движение». Через космос передавались телефонные разговоры, телеграфные сообщения и даже цветное изображение.

Такие же эксперименты провели и американцы, перебросив через космос радиомост между Америкой и Европой.

## СПУСК С ОРБИТЫ

Пока все космические корабли летают по так называемым самотормозящимся орбитам. Первые спутники тормозились от трения об атмосферу, снижались и сгорали в более плотных ее слоях. Чем ниже орбита, тем меньше живет спутник. «Низкие» орбиты позволили максимально обезопасить полет человека: в случае отказа тормозных устройств корабль будет тормозиться в атмосфере и опустится на Землю сравнительно скоро. Конечно, время и место приземления в этом случае нельзя предугадать точно. Орбита корабля «Восход» была поднята над Землей значительно выше (апогей — 409 *км*). Поэтому уже нельзя было рассчитывать на самоторможение.

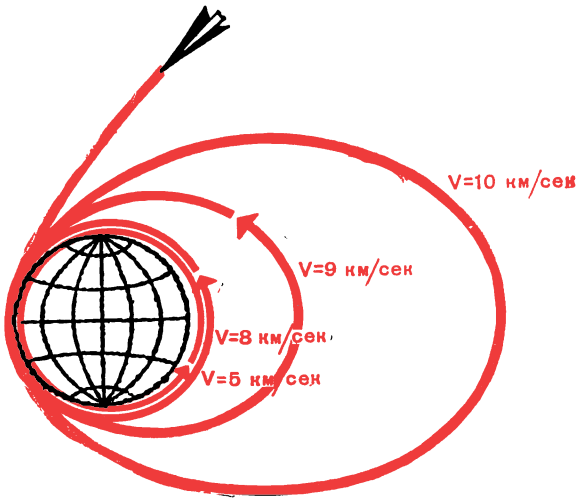
Чтобы обеспечить безопасный возврат космонавтов на Землю, на корабле были установлены два тормозных двигателя (один из них — запасной).

Корабли «Восток» и «Восход» могли спуститься с орбиты, используя как автоматическое, так и ручное управление. Перед спуском корабль разворачивается с помощью двигателей ориентации так, чтобы ось тормозного двигателя совпадала с направлением полета, а сила тяги этого двигателя была направлена навстречу полету, т. е. чтобы двигатель «тянул назад» и тормозил корабль. Запас энергии корабля падает, и он снижается... увеличивая скорость! Именно увеличивая, а не уменьшая. Это одно из свойств космических полетов.

Затормозив, корабль оказывается в плотных слоях атмосферы и из орбитального полета переходит на крутоспадающую траекторию спуска. После того как будет пройдена зона воздействия высоких температур, включается система приземления, т. е. дополнительная система торможения в нижних слоях атмосферы, которая обеспечит кораблю приземление с малой скоростью.

Пилот, находящийся на корабле «Восток», может приземлиться как в самом корабле, так и на парашюте после катапультирования и отделения кресла от корабля. Трехместному «Восходу» конструкторы обеспечили «мягкую посадку». Необходимость иметь в запасе еще и катапультирование полностью отпала.

Основная проблема при возвращении из космоса — тепловая защита корабля ниже 250—100 *км*, когда уже сказывается сопротивление атмосферы. Ученые занялись этой проблемой еще до запуска первых спутников. Уже тогда было ясно: какую ни выбрать




**Постепенное торможение космического корабля. В апогее орбиты, при проходе через верхние слои атмосферы корабль тормозится, и на следующей орбите его скорость уже уменьшается.**

траекторию спуска, придется защищать аппарат от перегрева и выдерживать весовые перегрузки. Проще всего было бы спускаться по планирующей траектории, тогда торможение может быть как угодно медленным, будут малыми перегрузки и перегревы. Но для планирующего спуска кораблю нужны крылья. Крылатый корабль мог бы снижаться и по рикошетирующей траектории. Когда-нибудь такие корабли будут как бы нырять в земную атмосферу, тормозиться в ней и снова выскакивать, чтобы остывать,— и так несколько раз, пока не будет погашена бо́льшая часть скорости корабля.

Но пока такие планирующие космопланы не созданы, наиболее эффективный способ — применять тормозной двигатель. Предлагались, правда, и тормозящие «паруса», но, чтобы спуститься с высоты 500 до 80 *км* при помощи «паруса» в 200 $м^2$, кораблю пришлось бы сделать миллион оборотов вокруг Земли.

Тяга тормозного двигателя должна быть направлена строго по касательной к траектории полета. Чем резче будет тормозиться корабль, тем меньше понадобится ему горючего и тем, следовательно, он может быть легче.

При быстром прохождении атмосферы поверхность кабины нагревается очень сильно. Гагарин наблюдал при спуске как за жаропрочным иллюминатором буквально бушевало пламя. Но за малое время спуска сгореть успевает только слой тепловой защиты, да и то лишь частично, а сама кабина не прогревается. При медленном торможении поверхностный нагрев будет меньше, но общее количество выделившегося тепла больше, а значит, отвести тепло и изолировать кабину сложнее.

Тормозить корабль в воздухе могут парашюты. Парашютные системы открываются сразу же после входа корабля в плотные слои атмосферы. Но последний этап спуска — приземление — они обеспечить не могут. Если бы корабль приземлялся только на парашюте, удар его о почву мог бы вызвать перегрузку, опасную для жизни космонавта. Именно из-за этого один из полетов в Америке чуть было не окончился трагически.

Для смягчения удара предлагаются разные способы. Можно перед посадкой надувать под кораблем воздушные мешки: в момент посадки воздух сожмется, а частично будет выдавлен через специальные отверстия, на это израсходуется какая-то энергия, значит, уменьшится и перегрузка. Можно разместить на днище ячеистые соты из тонкой алюминиевой фольги или какой-либо пленки и заполнить их воздухом — такая подушка также смягчит удар.

Предлагается даже «прыгающая» посадка: корабль с плоским овальным днищем должен, подпрыгивая по грунту (как плоский камень по воде), постепенно погасить свою скорость. Правда, пока такой способ рассматривается всерьез лишь для доставки грузов.

Самый идеальный способ приземления «мягкая» посадка, впервые примененная на корабле «Восход». Этот способ самый дорогой и сложный, так как нужно включать двигатель и расходовать топливо но в принципе он может обеспечить любую скорость (а значит и «мягкость») посадки. Скорость снижающегося корабля гасится реактивными двигателями которые автоматически включаются на небольшом расстоянии от Земли. Тормоз-

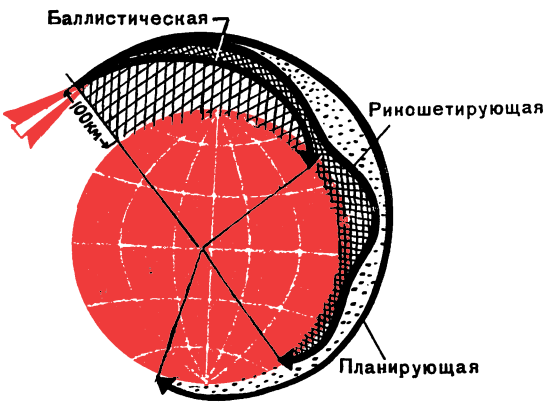



**Схема различных типов траекторий при спуске на поверхность Земли.**

ные двигатели действуют в сторону, противоположную направлению полета, и плавно снижают скорость корабля. Он как бы повисает в воздухе. Перегрузки при таком приземлении могут быть очень малы, а сам удар может вовсе отсутствовать.

На корабле «Восход» через некоторое время после того, как кончил работать основной тормозной двигатель и корабль стал сходить с орбиты, был отделен от кабины приборный отсек. В «аккуратном» спуске его на Землю нет необходимости, а лишний вес усложнил бы систему приземления.

Скорость была погашена при спуске в основном за счет торможения в атмосфере, где нагрузку приняла тепловая защита кабины корабля. Затем на высоте 5 *км* при скорости снижения около 220 *м/сек* были автоматически раскрыты парашюты, на них кабина и продолжала свой спуск. И только перед самой Землей был включен двигатель мягкой посадки.

Из сказанного видно, что строить пассажирские космопланы, выходящие из космоса без сильных перегрузок, станет возможным, лишь когда будут созданы мощные ракеты, способные вывести на орбиту многие тонны полезного груза, в том числе горючее, или крылья и сложные системы термозащиты.

Полеты на кораблях «Восток» и «Восход» подтвердили, что советские ученые и инженеры научились создавать космические корабли, которые полностью обеспечивают активный творческий полет.

## ПРОБЛЕМЫ БУДУЩЕГО

Никто не может предсказать, когда именно нога человека ступит на поверхность Луны, Венеры, Марса. Однако многие научно-технические проблемы, связанные с подготовкой и проведением таких полетов, уже сейчас оживленно обсуждаются учеными.

Прежде всего обсуждается проблема топлива. Если бы было можно увеличить его калорийность в 2—3 раза, то уже существующие ракеты с экипажем смогли бы облететь Луну и вернуться на Землю. Увеличение калорийности топлива еще в несколько раз позволило бы совершить такие же полеты к Венере и Марсу.

На этом, по всей вероятности, и кончаются возможности химического топлива. Во-первых, никакие ухищрения не позволяют безгранично увеличивать его калорийность, т. е. запас химической энергии. Во-вторых, любое химическое

топливо занимает много места, оно слишком тяжело и часто таит в себе опасность взрыва.

Чем дальше рейс, тем больше, а значит, и тяжелее должен быть космический корабль: тем больше кислорода, воды и пищи он должен нести в себе, тем больше должны быть источники электропитания. При той скорости, которую может развить ракета на химическом топливе, продолжительность полета к Луне и обратно не превысит 2—3 недель, а полеты к Венере и Марсу продлятся минимум 1—2 года. Полеты к большим планетам, Юпитеру или Сатурну, заняли бы десятилетия.

Ясно, что здесь нужны принципиально новые решения. Наука и техника уже вплотную подошли к созданию таких ракетных двигателей, которые при гораздо меньшем размере и весе будут развивать невиданную еще скорость. В первую очередь это атомные, плазменные и ионные двигатели. Не вдаваясь в детали, скажем только, что с помощью таких ракетных систем можно будет отправлять в полет к планетам космические корабли, весящие многие десятки тонн, и развивать скорость до 100 *км/сек*. Впервые в мире плазменные двига-

тели были применены на советской автоматической космической станции «Зонд-2». Они были включены в систему ориентации этой ракеты и успешно прошли испытания в космосе.

Из других проблем космонавтики уже сейчас встает перед учеными и инженерами проблема ориентировки в космическом пространстве. Опыт посылки автоматических межпланетных станций говорит, что для точного полета нужно иметь возможность один или несколько раз подправить ракету на космической трассе.

Но в какую сторону и на сколько градусов нужно изменить направление полета? На сколько метров в секунду нужно ускорить или затормозить полет? Все летательные аппараты, трассы которых пролегают вблизи Земли, ориентируются по видимым точкам или радиоориентирам, расположенным на ее поверхности. Все полеты в космосе до сих пор также корректировались с Земли с помощью разветвленной сети наблюдательных станций. Эти станции передавали свои наблюдения в счетно-вычислительный центр, там определялись поправки, которые и посылались на летящую ракету.

Но чем дальше от Земли пролегают трассы космических кораблей, тем труднее следить за ними и тем менее надежна с ними связь. Значит, автоматы или сами космонавты-должны ориентироваться по звездам, находить свое место в космическом пространстве и вычислять поправки своей траектории. Они должны знать точное расстояние от Солнца, от Земли и от планеты назначения, иметь приборы, показывающие скорость и количество пройденных километров, акселерометры, автоматически фиксирующие примененные ускорения, они должны знать точное направление своего движения. Одна из важнейших задач космонавтики — создать этот комплекс приборов, а также компактные и надежные электронно-вычислительные машины, способные быстро обрабатывать показания приборов.

Не менее сложно обеспечить космонавтов пищей, водой, кислородом, сконструировать скафандры, приспособленные как к жаре и плотной атмосфере Венеры, так и к разреженному и холодному воздуху Марса. Десятки проблем встают перед наукой, разрабатывающей будущие полеты в космос.

■

# КРЫЛАТЫЙ ПОЛЕТ

Люди издавна мечтали о покорении воздушной стихии. Народная фантазия рисовала ковры-самолеты, крылатые колесницы, огромных сказочных птиц, которые переносили человека по воздуху.

Чтобы полететь, надо преодолеть земное притяжение. «Человек,— говорил отец русской авиации Н. Е. Жуковский,— полетит, опираясь не на силу своих мускулов, а на силу своего разума». Наблюдая природу, человек постепенно постиг физические законы, осознал их и использовал для создания летательных аппаратов разных типов.

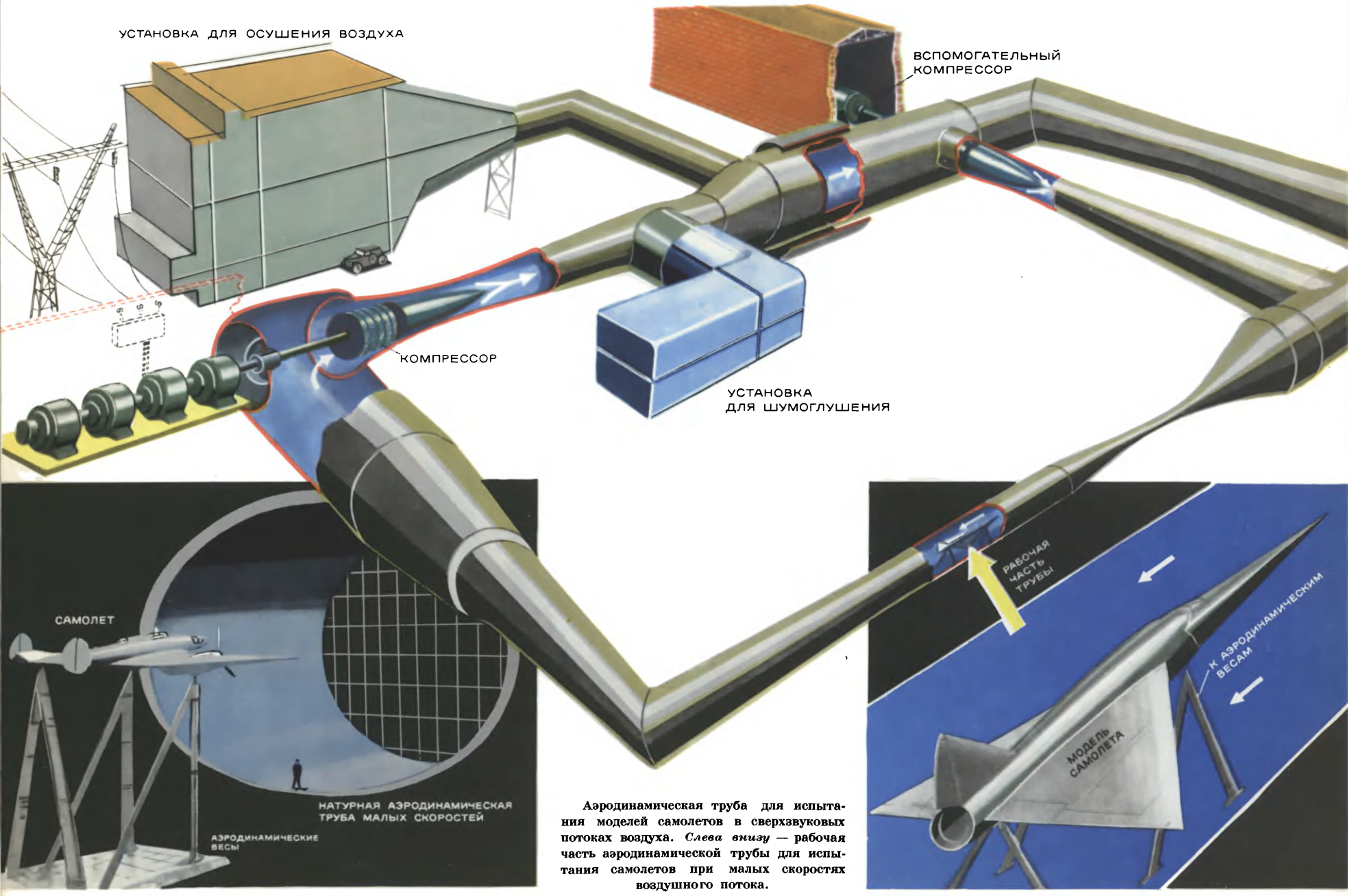
Очевидно, по образу и подобию парящих в небе **облаков** были созданы первые средства полета: летательные аппараты легче воздуха— воздушные шары, дирижабли. Воздушные шары и сейчас используются для изучения атмосферы, для решения задач геофизики и метеорологии.

**Птицы** опираются в полете на воздух; они подсказали человеку принцип летательных аппаратов тяжелее воздуха — планеров, самолетов и вертолетов. Уже сейчас самолеты летают быстрее звука и превышают скорость артиллерийских снарядов (скорость звука — около 1200 *км/час*, снаряда —около 2000 *км/час*). Самолеты могут подниматься на 25 и даже на 40 *км*. Ни одна птица не летает так быстро и так высоко.

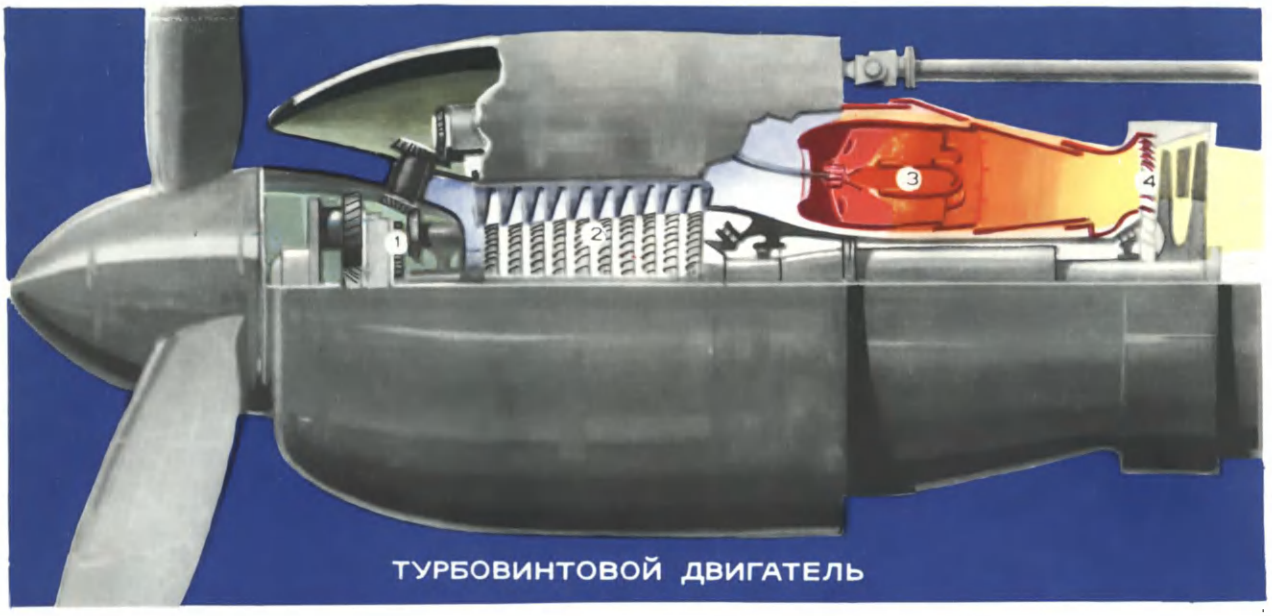
**Брошенный камень** летит по инерции, если ему сообщить достаточную начальную скорость. На этом принципе человек создал ружье, пушку, ракету.

## АППАРАТЫ ЛЕГЧЕ ВОЗДУХА

Воздух, как и жидкость, обладает весом и давлением. На уровне моря 1 $м^3$ воздуха весит приблизительно 1,3 *кг*, а атмосферное давление — около 1 *бар*. С увеличением высоты плотность воздуха и давление в нем резко уменьшаются:




**Аэродинамическая труба для испытания моделей самолетов в сверхзвуковых потоках воздуха. *Слева внизу* — рабочая часть аэродинамической трубы для испытания самолетов при малых скоростях воздушного потока.**



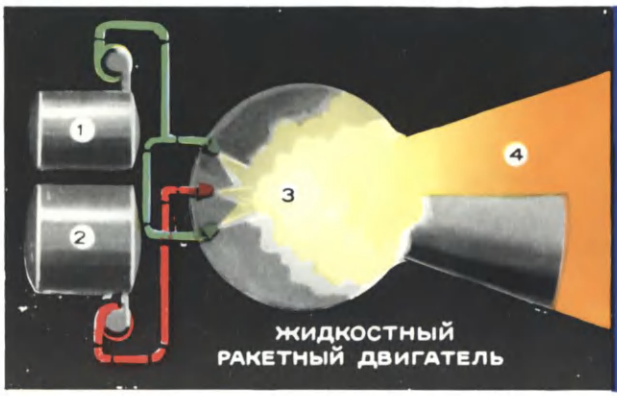


***Таблица к статье „Крылатый полет"***

Типы самолетных двигателей. *Турбовинтовой двигатель*: *1* — редуктор, *2* — компрессор, *3* — камера сгорания, *4* — турбина. *Турбореактивный двигатель*: *1*— воздухозаборник, *2* — компрессор, *3* — камера сгорания, *4*— турбина, *5* — форсажная камера, *6* — реактивное сопло. *Прямоточный воздушно-реактивный двигатель*: *1* —воздухозаборник, *2*— камера сгорания, *3* — реактивное сопло. *Жидкостный реактивный двигатель*: *1* и *2*—резервуары для топлива и окислителя, *3* — камера сгорания, *4* — реактивное сопло.

| Высота в *км* | Во сколько раз уменьшается плотность | Во сколько раз уменьшается давление |
|---|---|---|
| 0 | 1,0 | 1,0 |
| 5 | 1,7 | 1,9 |
| 10 | 3,0 | 3,8 |
| 15 | 6,3 | 8,4 |
| 20 | 14 | 18 |
| 30 | 69 | 85 |
| 40 | 310 | 340 |
| 50 | 1 140 | 1 200 |
| 60 | 3 700 | 4 150 |
| 70 | 13 200 | 18 800 |
| 80 | 58 500 | 91 000 |

Высоту в 40—60 *км*, где плотность и давление воздуха уменьшаются в сотни раз, обычно считают практической границей атмосферы.

«Всякое тело, погруженное в жидкость, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость» — этот закон Архимеда может быть отнесен и к воздуху. Поэтому для преодоления силы тяжести надо, чтобы летательный аппарат был очень легким и при этом вытеснял бы значительный объем воздуха. Такой аппарат можно себе представить просто в виде пустотелого шара, из которого выкачан воздух. Но на такой шар будет действовать большое атмосферное давление, и оболочка его должна быть очень прочной.

При современном уровне техники нельзя сделать оболочку одновременно и легкую и достаточно прочную. Но если шар заполнить газом более легким, чем воздух (т. е. с меньшей плотностью), то давление изнутри и снаружи шара можно уравновесить. Обычно используют водород или гелий: водород в 14, а гелий в 7 раз легче воздуха.

Первые воздушные шары заполнялись нагретым воздухом: при нагревании воздух расширяется и становится легче. Такие воздушные шары были впервые построены в конце XVIII в. во Франции братьями Монгольфье. Модель такого шара нетрудно сделать самому. Надо склеить его из долек папиросной бумаги и снизу через отверстие наполнить теплым воздухом, подержав шар, например, над костром. Шар перестанет летать, когда воздух в нем охладится.

Современный воздушный шар с герметической кабиной для человека называется **стратостатом**. Чтобы такой шар смог подняться на большую высоту, где плотность воздуха становится все меньше и меньше, он должен вытеснять все больший и больший объем воздуха. Поэтому приходится сначала шар заполнять газом не полностью; по мере того как шар поднимается, давление в атмосфере становится меньше и шар расширяется сам (рис. 1). Для полетов на большой высоте шар делают очень большим, диаметр его достигает десятков метров. В 1935 г. в СССР и США стратостаты поднимались на высоту около 22 *км*. Подъемная сила зависит от разницы между плотностями воздуха и газа, наполняющего стратостат. Каждый кубометр водорода на уровне моря обладает подъемной силой:

$$F = (\rho_в - \rho_{H_2}) \cdot g =$$

$$= \left(1{,}29 \frac{кг}{м^3} - 0{,}09 \frac{кг}{м^3}\right) \cdot 9{,}81 \frac{н}{кг} \approx 12 \frac{н}{м^3}.$$

Чтобы поднять груз с массой в 1 *кг*, нужно приложить силу в 9,81 *н*. На каждый килограмм груза объем воздушного шара, наполненного водородом, должен быть:

на уровне моря — 0,84 $м^3$,
на высоте 20 *км* — 11,5 $м^3$,
на высоте 30 *км* — 57 $м^3$,
на высоте 40 *км* — 260 $м^3$.

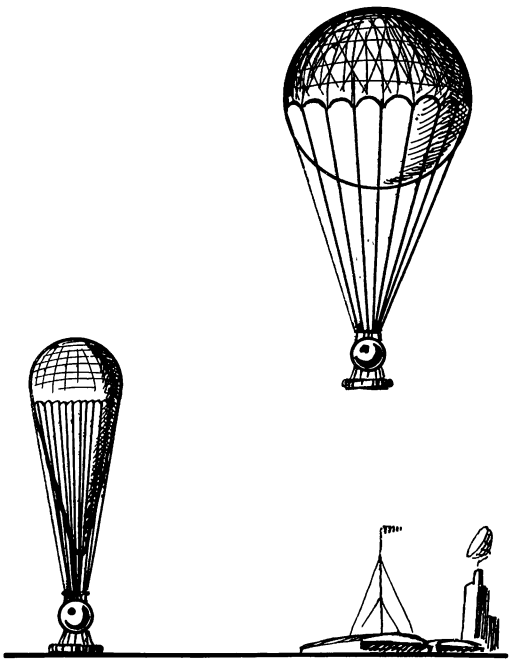


**Рис. 1. На взлетной площадке воздушный шар наполняется не полностью. На большой высоте газ расширяет его оболочку.**

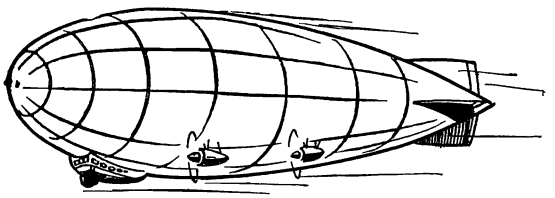


Рис. 2. Дирижабль.

Оболочка воздушных шаров должна быть сделана из очень легкого и прочного материала. Современная химическая промышленность изготовляет специальные пленки, 1 $м^2$ которых весит 30—50 *г* (30 лет назад материал для оболочки стратостатов весил 100—150 $г/м^2$).

Воздушные шары почти неуправляемы и летят, куда дует ветер. Поэтому сейчас они используются только для научных исследований атмосферы Земли, для разведки погоды, а иногда и для военной разведки. На таких шарах установлена специальная аппаратура, которая передает полученные сведения по радио. В годы второй мировой войны на привязанных воздушных шарах (аэростатах) поднимались проволочные противоавиационные заграждения.

Аппарат легче воздуха можно снабдить двигателем и рулями, и тогда он летит в нужную человеку сторону. Такой управляемый аппарат называется д и р и ж а б л е м. Чтобы сопротивление воздуха было как можно меньше, дирижаблю придают вытянутую сигарообразную форму (рис. 2). Для жесткости его оболочка натянута на металлический каркас. Строились и цельнометаллические дирижабли, внутри которых были расположены резервуары с легким газом.

Понятно, что дирижабль не может летать так же высоко, как стратостат, потому что объем его почти постоянен. Обычно дирижабли достигают высоты не более 6 *км*, а максимальная скорость их — около 150 *км/час*.

Строительство дирижаблей развернулось после первой мировой войны. Сначала дирижабли были построены в Германии, затем в США и СССР.

Но широкого распространения они не получили. Водород, которым их наполняли, легко воспламеняется (были случаи, когда дирижабли сгорали в воздухе), дирижабли большого размера могут сломаться, попав в сильный ветер. Наконец, дирижабли оказались непригодными для военных действий: их легко сбить из-за большого размера, малой скорости и малой высоты полета. Но дирижабли не похоронены. Во многих странах проектируют и начинают строить дирижабли-гиганты для перевозки очень больших грузов.

## ПОЧЕМУ ЛЕТАЕТ САМОЛЕТ

При выстреле из ружья стрелок ощущает отдачу — толчок приклада в плечо. Эта сила действует на приклад ружья очень короткое время — около 0,002 *сек*. Но на станок пулемета эта сила действует почти постоянно, пока пули вылетают из ствола.

Так же и летательный аппарат может получать постоянную подъемную силу, если он беспрерывно отбрасывает воздух вниз. Именно для этого и нужны самолету крылья. Если крыло двигается горизонтально и при этом поставлено под углом к направлению движения (этот угол называется у г л о м а т а к и), оно отбрасывает встречный воздух вниз (рис. 3) и тем самым

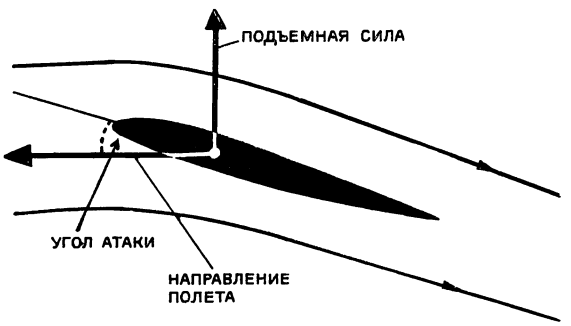



Рис. 3. Крыло, поставленное под углом атаки, отбрасывает при движении воздух вниз и этим создает подъемную силу.

создает подъемную силу, направленную вверх.

Образование подъемной силы основано на законе механики о количестве движения (второй закон Ньютона):

$$m(v_2 - v_1) = P \cdot t,$$

где $m$ — масса тела (в нашем случае это масса отбрасываемого воздуха); $v_2 - v_1$ — изменение скорости тела (в нашем случае — вертикальная скорость отбрасываемого воздуха); $P$ — сила, действующая на тело (в нашем случае она приложена к воздуху и направлена вниз), и $t$ — время.

Следовательно,

$$P = \frac{m}{t}(v_2 - v_1).$$

Так как всякое действие всегда встречает равное по величине и противоположно направленное противодействие (третий закон Ньютона), то подъемная сила $Y$ будет равна силе $P$, приложена к крылу самолета и направлена вверх: $Y = -P$.

Величина подъемной силы зависит от массы ежесекундно отбрасываемого воздуха $\frac{m}{t}$, а она в свою очередь зависит от плотности воздуха $\rho$, скорости полета $v$ и площади крыла $S$; вертикальная скорость воздуха $v_2 - v_1$ зависит от угла атаки крыла и скорости полета. Тогда величину подъемной силы можно выразить формулой:

$$Y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S,$$

где $C_y$ — коэффициент, который зависит от формы крыла и угла атаки.

Итак, подъемную силу можно создавать довольно просто, но для этого обязательно нужно, чтобы крыло в воздухе двигалось. Решается это по-разному: птицы, например, машут крыльями; планеры используют снижение — сопротивление воздуха преодолевается силой тяжести. Самолету же нужен специальный двигатель. Но, может быть, выгоднее повернуть этот двигатель так, чтобы его тяга компенсировала и тяжесть аппарата? В этом нет необходимости, так как подъемная сила крыла во много раз больше сопротивления воздуха. Отношение получаемой подъемной силы к сопротивлению называется аэродинамическим качеством. В настоящее время для дозвуковых самолетов это отношение достигает 25, а для сверхзвуковых — 7.

Развитие авиации во многом зависит от открытий и изобретений в различных областях науки и техники, и в первую очередь от развития науки об обтекании тел газом — аэродинамики. Начала этой науки заложены исследованиями русских ученых Н. Е. Жуковского, С. А. Чаплыгина, С. А. Христиановича, немецких ученых Р. Прандтля, Т. Кармана и др. Кроме того, большую роль в развитии авиации играют: наука о механике полета, материаловедение, изобретения в промышленности, строящей двигатели, и в приборостроении.

## «ЗВУКОВОЙ БАРЬЕР» И «ТЕПЛОВОЙ БАРЬЕР»

В 50-х годах самолеты преодолели «звуковой барьер» — их скорость стала больше скорости звука, т. е. больше 1200 *км/час*, или 340 *м/сек* (на большой высоте, где температура ниже, скорость звука уменьшается). Преодолеть этот барьер было нелегко.

Когда какое-нибудь тело, например крыло самолета, движется, в воздушной среде возникают возмущения в виде волн сжатия и разрежения (рис. 4). Они «подготовляют» воздух к обтеканию крыла: частицы воздуха приобретают скорость и «расступаются» еще до того, как их достигнет передняя кромка крыла. Но так будет лишь в том случае, если скорость движения крыла меньше скорости звука, с которой распространяются возмущения. Только при этом условии возмущения смогут обогнать крыло и «подготовить» воздух к «встрече» с ним. В результате воздух плавно обтекает крыло.

Если же крыло двигается быстрее, чем звук, то возмущения уже не обгоняют крыло и не подготавливают воздух к «встрече». Мало того, распространяясь во все стороны в неподвижном воздухе, эти возмущения будут накопляться, сжимая воздух, как это показано на рисунке, вдоль двух линий, которые называются ударными волнами. Обтекание крыла уже не будет плавным. Это создает дополнительное, так называемое волновое сопротивление. (Когда самолет пролетает со сверхзвуко-

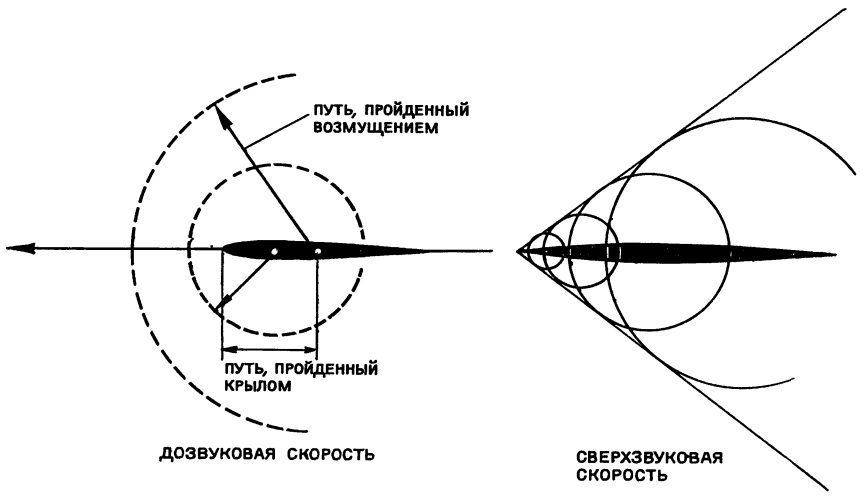



**Рис. 4. При дозвуковой скорости возмущения в воздухе обгоняют крыло. При сверхзвуковой скорости эти возмущения сосредоточиваются на двух линиях, образуя ударную волну.**

вой скоростью, то на земле мы часто слышим как бы удары грома — это доходит до нас ударная волна). Поэтому при сверхзвуковой скорости сопротивление движению значительно больше.

В аэродинамике удобно измерять скорость не в метрах в секунду или километрах в час, а в отношении скорости полета к скорости звука. Эта величина называется числом Маха:

$$M = \frac{\text{скорость полета}}{\text{скорость звука}}.$$

Число $M = 1$ соответствует скорости полета около 1200 *км/час*, или 340 *м/сек*. Чем больше число $M$, тем сильнее проявляется сжимаемость воздуха. При небольшой дозвуковой скорости, когда число $M$ меньше 0,7 , сжимаемостью воздуха можно пренебречь: воздух ведет себя так же, как любая жидкость. Раздел аэродинамики, изучающий обтекание различных тел воздухом без учета его сжимаемости, называется **гидродинамикой**, в отличие от **газовой динамики**, в которой учитывается сжимаемость воздуха.

Преодоление «звукового барьера», т. е. завоевание самолетами скоростей, соответствующих числу $M>1$, потребовало от ученых и инженеров широких исследований в газовой динамике. Они стремились уменьшить аэродинамическое сопротивление и создать как можно более плавное обтекание самолета. Сейчас летчик даже не замечает, когда самолет превышает скорость звука, а многие первые попытки получить при пикировании даже околозвуковую скорость на старых самолетах кончались катастрофой: самолет начинало бросать, он переставал быть управляемым.

Ученые продолжают искать, как еще больше увеличить скорость самолета. И тут обнаруживаются новые интересные явления.

Вот самолет подготовлен к рекордному полету. Он выглядит совсем новым, как будто и не совершили на нем множество тренировочных полетов. «Взлет разрешаю!» — передает по радио руководитель полетов, и самолет стремительно уходит ввысь. Через полчаса, когда он идет еще на посадку, уже известно: в течение нескольких минут самолет превысил скорость звука больше чем вдвое.

Знакомая во всех деталях машина подруливает к ангару. Но что это? Краска, которой написаны большие опознавательные номера, потемнела и обуглилась; сверкающая металлическая поверхность самолета во многих местах покрылась пятнами; помутнели стекла кабины летчика. Такое впечатление, будто самолет побывал в раскаленной печи. Но ученые и инженеры ждали этого!

Сжатие нагревает газ, и он передает теплоту окружающим предметам. Поэтому, например, нагревается насос, когда накачивают велосипедную шину. То же происходит и с самолетом: при полете с большим числом $M$ он сильно нагревается. Иными словами, преодолев звуковой барьер, самолеты встречаются с **тепловым барьером**. Если полет происходит в стратосфере (т. е. выше 11 *км*), где температура воздуха равна — 56,5° Ц, то на поверхности самолета температура может достигать:

| **Число М** | **0,5** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Температура поверхности в $t°$ Ц | —45° | —15° | +115° | +230° | +610° | +950° |

Все материалы при нагревании становятся менее прочными. Так, у алюминия, который чаще всего применяется в конструкциях самолетов, прочность снижается очень заметно при температуре около + 200° Ц. Чтобы преодолеть тепловой барьер, будут применены новые жаростойкие материалы из металлов и полимеров (уже сейчас для самолетов начинают применять сталь и титан), но, конечно, изменится и форма самолета. Это сделают ученые и конструкторы.

Если еще больше увеличить скорость полета (до числа $M = 10—15$), температура воздуха станет такой большой, что уже необходимо учитывать изменения физических и химических свойств газов, образующиеся у самого крыла. Исследование течения воздуха при таких скоростях началось сравнительно недавно, и получены лишь первые результаты.

## ЗАКОНЫ АЭРОДИНАМИКИ И ОБТЕКАНИЕ КРЫЛА

Важнейшие физические законы — закон сохранения энергии и закон сохранения массы — играют существенную роль в аэродинамике.

В простейшем случае, когда воздух ведет себя как несжимаемая жидкость, эти законы выглядят сравнительно просто. Вся энергия жидкости складывается из кинетической энергии, которая тем больше, чем больше скорость, и потенциальной, которая определяется статическим давлением в воздухе. Этот закон, окончательно сформулированный швейцарцем Бернулли, указывает: если скорость жидкости растет, то давление будет уменьшаться; если она уменьшается, давление увеличивается.

Закон сохранения массы говорит о том, что через любое поперечное сечение потока должно проходить в каждую секунду одно и то же количество газа. Для несжимаемой жидкости закон этот прост: произведение площади поперечного сечения потока на его скорость есть величина постоянная, т. е. чем меньше поперечное сечение потока, тем больше должна быть скорость. Этот закон наглядно проявляется в течении реки: она течет быстрее там, где ее русло мелкое или узкое. Следовательно, там, где скорость потока жидкости увеличивается, его поперечное сечение становится меньше, а по закону сохранения энергии уменьшается при этом и давление.

Когда скорость течения воздуха близка к числу $M = 1$, уже нельзя пренебрегать сжимаемостью, нужно учитывать, что всякий газ при уменьшении давления расширяется и стремится занять больший объем. При этом происходит борьба двух явлений: с одной стороны, увеличение скорости требует сужения потока, а с другой,— это же увеличение скорости приводит к уменьшению давления воздуха, что требует уже расширения потока. Оказывается, при дозвуковых скоростях сильнее первое явление, а при сверхзвуковых — второе.

На рисунке 5 показано, что увеличение скорости при числе $M<1$ сопровождается сужением потока, самое узкое место потока — при скорости, равной скорости звука. Дальнейшее увеличение скорости расширяет поток.

Используя эти законы, можно объяснить обтекание крыла самолета. На рисунке 6 показаны траектории частиц воздуха, когда они обтекают поперечное сечение тел (**профиль**).

Профиль крыла как бы раздвигает поток, и отдельные струйки сужаются, причем особенно сильно в верхней передней части профиля. Но там, где струйки сужаются, скорость будет больше, а давление меньше. В результате давление распределяется по профилю, как показано на рисунке 7. Суммарная подъемная сила направлена вверх и приложена приблизительно на $^1/_4$ ширины профиля. Эта подъемная сила в основном получается благодаря разрежению воздуха над верхней частью крыла.

Когда воздух обтекает что-либо со сверхзвуковой скоростью, в нем возникают скачкообразные увеличения плотности и так называемые **волны разрежения**. Скачок уплотнения — это линия, перейдя которую скорость сверхзвукового потока резко уменьшается, а давление, следовательно, возрастает. В реальных газах толщина этой линии соответствует всего лишь несколь-

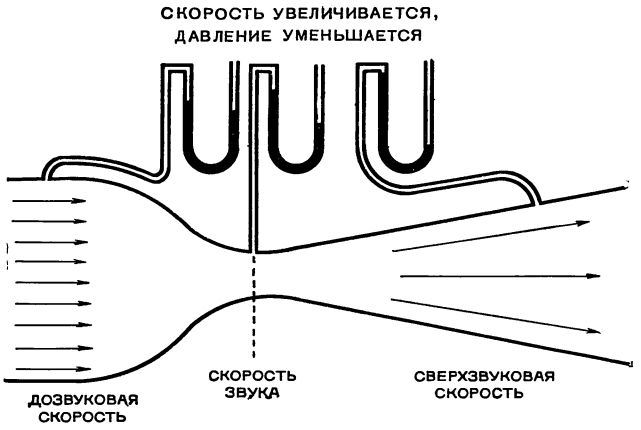



**Рис. 5. Исследование давлений среды в аэродинамической трубе. При дозвуковой скорости поток сужается и скорость увеличивается. При сверхзвуковой скорости поток расширяется.**

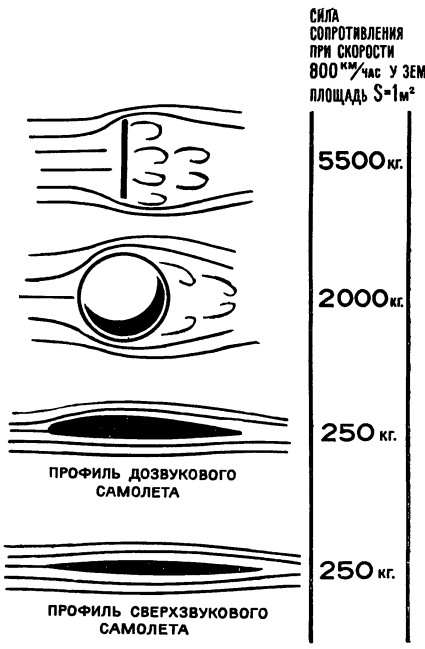



**Рис. 6. Сопротивление воздуху тел с различной геометрической формой при дозвуковой скорости.**

ким расстояниям, обычным между молекулами. Волной разрежения называют линию, при переходе через которую скорость потока увеличивается с одновременным уменьшением давления.

На рисунке 8 показано, как воздух обтекает профиль крыла при сверхзвуковой скорости. В этом случае суммарная подъемная сила создается как разрежением воздуха над верх-

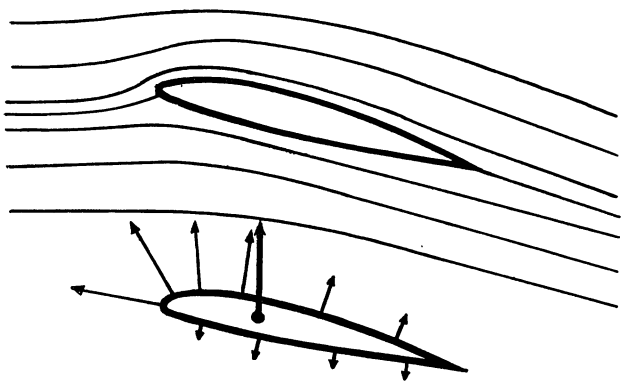


Рис. 7. Обтекание профиля крыла при дозвуковой скорости.

ней поверхностью крыла, так и давлением на нижнюю поверхность. Приложена подъемная сила приблизительно в середине профиля.

Чем больше угол атаки, тем сильнее изменяется скорость воздуха, обтекающего крыло, и тем больше подъемная сила. Но при углах атаки 10—20° (в зависимости от формы крыла и его профиля) плавное обтекание нарушается. Наступает, как говорят, «срыв потока»: подъемная сила начинает уменьшаться, а сопротивление резко увеличивается.

Основное сопротивление при дозвуковых скоростях — это сопротивление трения. Оно обусловлено тем, что молекулы воздуха как бы прилипают к поверхности тела. При этом в очень узком слое около тела (его называют пограничным слоем) частицы воздуха скользят относительно друг друга. А так как воздух обладает вязкостью, от этого скольжения частиц и создается сопротивление. Сопротивление трения тем меньше, чем более гладка поверхность тела. Его можно сделать еще меньше, если отсасывать воздух через мелкие отверстия внутрь тела. В некоторых конструкциях самолетных крыльев такие отверстия применяются.

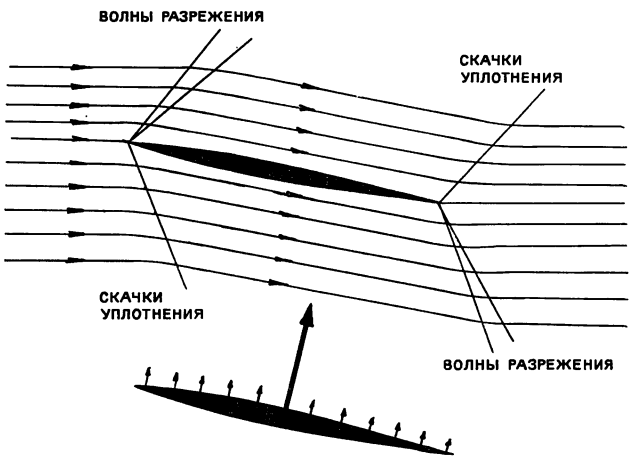



Рис. 8. Обтекание профиля крыла при сверхзвуковой скорости.

Если обтекание тела не проходит плавно, а при этом образуются вихри (подобно вихрям за тупой кормой лодки), то это неизбежно увеличит сопротивление тела. Такое сопротивление называется вихревым. Чтобы уменьшить вихревое сопротивление, хвостовая часть тела должна быть плавной. Только при очень большой сверхзвуковой скорости (при числе $M = 5—6$) форма задней части тела мало сказывается на величине его сопротивления воздушному потоку.

Совсем другие причины вызывают волновое сопротивление. Оно возникает только при сверхзвуковых скоростях. Это сопротивление обусловлено потерями энергии, которая затрачивается на образование скачков уплотнения. Волновое сопротивление тем меньше, чем тоньше тело и чем более остра его носовая часть. При сверхзвуковой скорости волновое сопротивление — это основная доля общего сопротивления.

Когда угол атаки возрастает, сопротивление увеличивается. Вспомним, что аэродинамическое качество — это отношение подъемной силы к сопротивлению. При малых углах атаки подъемная сила близка к нулю. Поэтому и аэродинамическое качество мало. При больших углах атаки, когда подъемная сила начинает ослабевать, а сопротивление сильно возрастает, аэродинамическое качество тоже уменьшается. Значит, аэродинамическое качество где-то имеет максимальное значение, обычно при углах атаки 3—5°.

Для дозвуковых самолетов выгодно применять длинные узкие крылья, чтобы получить бóльшую величину аэродинамического качества. Такие крылья (рис. 9,*а*) прочны, конечно, только при достаточно большой толщине. А это значит, что при сверхзвуковых скоростях такие крылья непригодны — они оказывают слишком большое сопротивление полету.

Для сверхзвуковых самолетов крылья должны быть тонкими и, следовательно, короткими (малого удлинения). Их обычно делают треугольными или стреловидными (см. рис. 9,*в*), что тоже уменьшает волновое сопротивление и увеличивает аэродинамическое качество.

Аэродинамическое качество сверхзвуковых

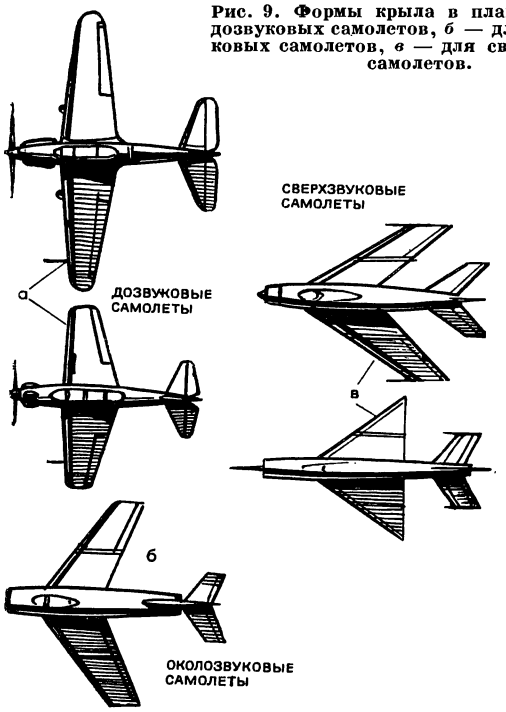



**Рис. 9. Формы крыла в плане: *а* — для дозвуковых самолетов, *б* — для околозвуковых самолетов, *в* — для сверхзвуковых самолетов.**

самолетов пока еще в 2—3 раза меньше, чем дозвуковых. Повышение аэродинамического качества — одна из основных проблем аэродинамики.

## КАК ПРОВЕРЯЮТ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Многое для самолетов и других летательных аппаратов можно рассчитать теоретически, особенно теперь, когда на помощь ученым и инженерам пришли электронно-счетные машины, производящие десятки тысяч вычислений в секунду. Но одних расчетов недостаточно. Важнейший критерий всякой теории — практика. Поэтому, прежде чем строить самолет, надо убедиться, правильны ли расчеты. На помощь приходят аэродинамические трубы: в них изучают, как воздух обтекает модели летательных аппаратов. Простейшая принципиальная схема аэродинамической трубы изображена на рисунке 10.

В аэродинамических трубах используется принцип относительности движения: в отличие от естественных условий модель аппарата неподвижна, а воздушный поток движется.

Одна из первых действующих аэродинамических труб была построена Н. Е. Жуковским в 1902 г. Труба была совсем небольшая, квадратного сечения (0,75 × 0,75 *м*); скорость потока в ней доходила всего лишь до 9 *м/сек*, т. е. 32 *км/час*. А сейчас строят аэродинамические трубы, в которых небольшие самолеты можно исследовать в натуральную величину. Есть трубы, позволяющие развивать очень большую скорость воздушного потока — до $M = 15—20$. В таких «скоростных» аэродинамических трубах создаются условия, близкие к условиям реального полета: давление воздуха изменяется в соответствии с «высотой полета», а поток нагревается.

Если воздушный поток с большим числом $M$ создавать в аэродинамической трубе непрерывно с помощью вентиляторов, потребовалась бы мощность в сотни тысяч киловатт. Поэтому такие трубы чаще всего рассчитаны на прерывное действие: в них расходуется воздух, заранее накачанный в газгольдеры мощными компрессорами.

В современных аэродинамических трубах можно специальными весами быстро и точно измерить силы, которые действуют на модель. Обтекание модели воздухом можно даже сфотографировать. При этом используют изменение оптических свойств воздуха при изменении давления. А можно просто наклеить на поверхность модели короткие легкие шелковинки, которые будут струиться вместе с потоком воздуха. Для испытаний в сверхзвуковых аэродинамических трубах изготовляются металлические модели с очень большой точностью — до сотых долей миллиметра. Иногда аэродинамические трубы используют для исследования свободного полета. Для этого модель подвешивается в трубе на специальных подвижных опорах.

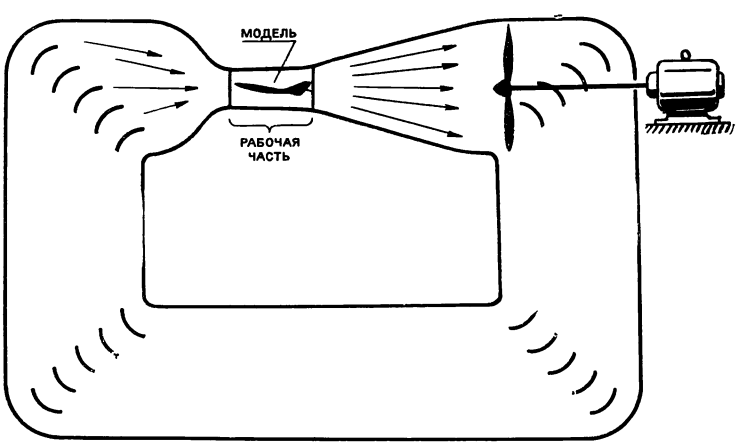



**Рис. 10. Поток обтекает модель самолета.**

Аэродинамические исследования летательных аппаратов обычно сосредоточены в больших институтах. В СССР один из таких институтов — ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского). Он организован по указанию В. И. Ленина в 1919 г. Н. Е. Жуковским и А. Н. Туполевым.

## АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Двигатель нужен самолету, чтобы преодолевать силу сопротивления, а при разгоне и силу инерции. Сила тяги двигателя рассчитывается на основании тех же законов механики, что и подъемная сила крыла.

От всех других двигателей авиационные отличаются тем, что они должны сравнительно мало весить при весьма большой мощности. Если двигатель окажется слишком тяжелым, то самолет не поднимется в воздух или не сможет взять с собой достаточное количество груза. Поэтому авиационные двигатели изготовляют из очень легких и вместе с тем достаточно прочных материалов; их детали всегда максимально облегчены. Но поскольку такие двигатели работают в тяжелых условиях (при большой температуре и с большими напряжениями), время их работы до ремонта, как правило, меньше, чем у других двигателей. Сравнительно короткое время работы авиационных двигателей вызвано также требованием особой надежности и безопасности.

Важнейший качественный показатель двигателя — его так называемый **удельный вес**, т. е. вес, приходящийся на единицу мощности, выраженную по традиции в лошадиных силах. Авиационные поршневые двигатели внутреннего сгорания имели в 30-х годах нашего века удельный вес 0,7—0,9 *кг/л. с.*, современные поршневые — 0,5 *кг/л. с.*, реактивные—всего 0,05—0,02 *кг/л. с.*, а у современных автомобильных двигателей — более 2 *кг/л. с.*

Чтобы преобразовать мощность поршневого двигателя в тягу, применяются воздушные винты. Их лопасти, подобно крылу, захватывают воздух и отбрасывают его назад. Это и создает тягу. Теория воздушного винта была создана Н. Е. Жуковским вслед за теорией подъемной силы крыла. На старых самолетах устанавливали деревянные винты. С увеличением скоростей полета потребовалась большая тяга и винты стали делать из металла.

Конструкторы стремятся создать двигатель, который затрачивал бы на получение тяги как можно меньше мощности. Для этого нужно, например, чтобы каждое сечение лопасти винта имело угол атаки, соответствующий его максимальному аэродинамическому качеству. Но при перемене скорости полета наиболее выгодные углы атаки этих сечений изменяются. Поэтому почти у всех современных воздушных винтов лопасти могут поворачиваться с помощью специальных механизмов вокруг своей оси (рис. 11).

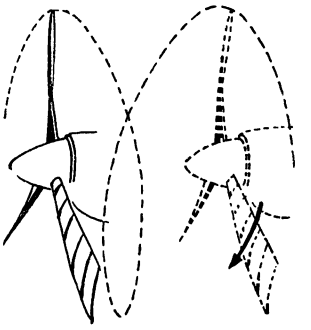


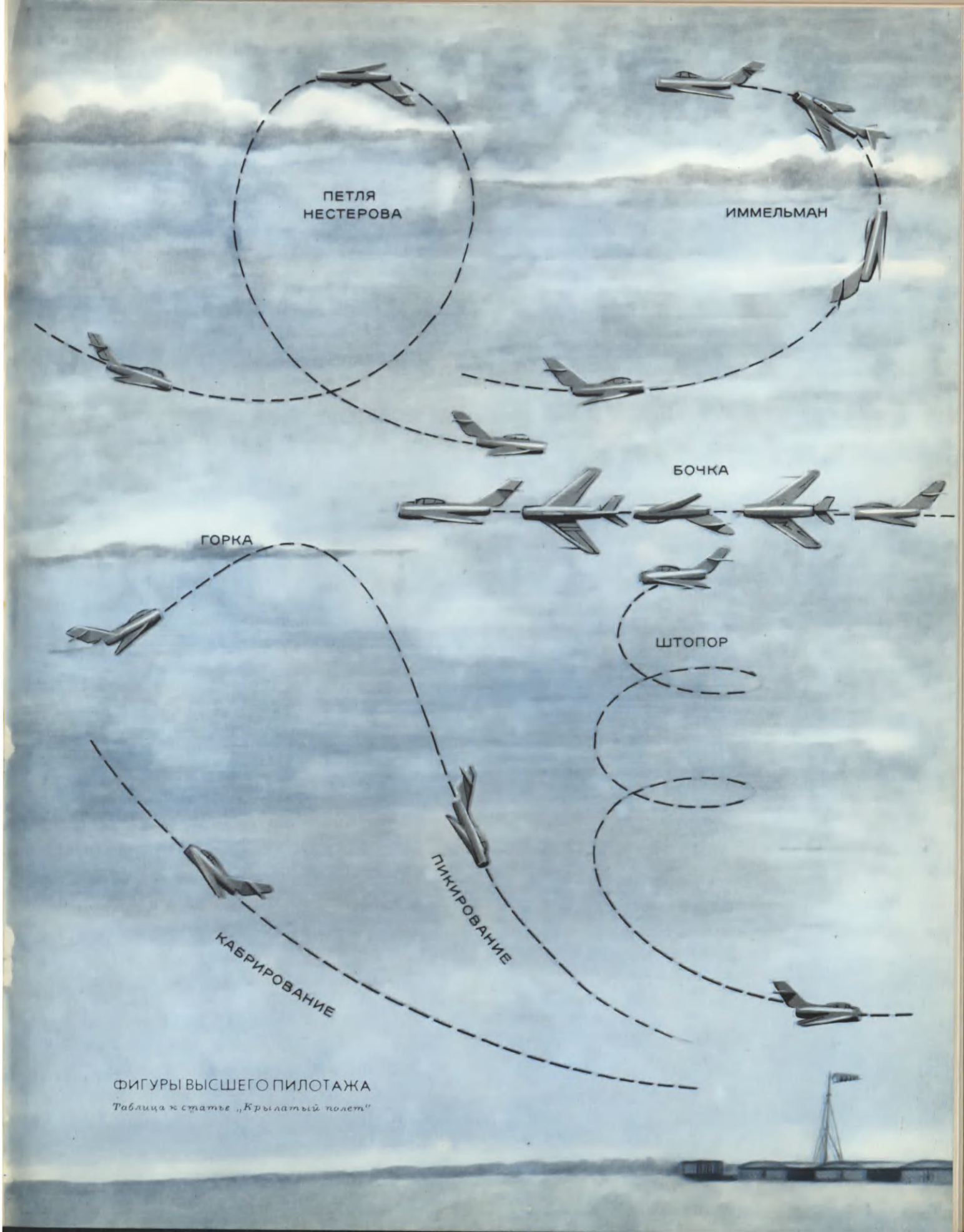
**Рис. 11. Угол атаки у лопастей воздушного винта уменьшается с удалением от оси лопасти.**

Это позволяет создавать наивыгоднейший угол атаки лопасти при любой скорости полета. Этот же механизм позволяет установить лопасть винта так, что он тормозит самолет, например, при посадке. В современных воздушных винтах управление установкой угла лопастей почти полностью автоматизировано.

На сверхзвуковых самолетах воздушные винты не применяются. Здесь тягу создает реактивный двигатель. Реактивные двигатели делятся на два основных типа — **воздушно-реактивные и ракетные**.

В простейших воздушно-реактивных двигателях, которые называют т у р б о р е а к т и в н ы м и (ТРД), используется воздух встречного потока. Воздух сжимается специальным компрессором; затем его сильно нагревают (сжигая, например, керосин); он проходит через турбину, которая вращает компрессор, и с большой скоростью вытекает назад через реактивное сопло (см. цвет. рис. у стр. 65).

Исходя из второго закона Ньютона, можно определить, что тяга двигателя равна ежесекундному приросту количества движения воздуха, протекающего через двигатель. Тяга тем больше, чем больше воздуха проходит через двигатель и чем больше увеличивается скорость воздушного потока. Скорость же эта зависит от температуры, достигнутой в результате сгорания топлива. Чем температура больше, тем лучше. Однако слишком большую температуру допускать нельзя — турбина может




ФИГУРЫ ВЫСШЕГО ПИЛОТАЖА

*Таблица к статье „Крылатый полет"*

сгореть. Правда, турбины сейчас делают из специальных огнеупорных материалов, которые позволяют повышать температуру потока до + 1000° Ц. Но пока это предел.

И все же выход найден. Конструкторы предложили вторично нагревать струю воздуха в так называемой **форсажной камере** уже после того, как эта струя раскрутит турбину компрессора. Тяга двигателя увеличивается на 30—50%.

Основная часть турбореактивного двигателя — его компрессор, к нему приложена вся тяга двигателя.

Современные мощные турбореактивные двигатели развивают тягу до 150 000 *н*; следовательно, они должны пропускать много воздуха — более 100 $м^3/сек$. Поэтому у передней, открытой навстречу потоку части двигателя — **воздухозаборника** — большие размеры; его внутренний диаметр нередко превышает 1,5 *м*.

Большая тяга реактивных двигателей требует также и большого количества топлива. На каждый ньютон тяги в течение часа нужно сжигать около 0,1 *кг* керосина. Много это или мало? Давайте подсчитаем. Если полный вес самолета 50 *т*, или около $5 \cdot 10^5$ *н*, а его аэродинамическое качество равно 5, то, чтобы преодолеть аэродинамическое сопротивление, двигатель должен развивать тягу не меньше $10^5$ *н*. Следовательно, за один час полета двигатели будут расходовать $100\,000\ н \times 0{,}1 \frac{кг\ горючего}{н\ тяги\ в\ час} = 10\ т$ керосина. А это $^1/_5$ веса всего самолета. Из этого понятно, какое большое значение имеет экономичность двигателя и аэродинамическое качество самолета.

При большой скорости полета ($M = 2$ или 3) воздух, пройдя через воздухозаборник, сам сильно сжимается. Компрессор с турбиной становятся ненужными. Поэтому можно применить двигатель другого типа — прямоточный воздушно-реактивный (ПВРД). Однако надо помнить, что на малых скоростях такой двигатель работать не будет.

Если добиться, чтобы турбина в ТРД поглощала почти всю энергию разогретого и ускоренного потока, то такая турбина сможет вращать не только компрессор, но и воздушный винт. На этом основана конструкция турбовинтового двигателя. Его можно сделать значительно более мощным, чем обычные двигатели внутреннего сгорания. Наибольшая мощность двигателя внутреннего сгорания равна примерно 3000 *квт* (примерно 4000 *л. с.*); при этом в двигателе должно быть не меньше 20 цилиндров. А современный турбовинтовой двигатель развивает мощность до 15 000 *квт*. Можно было бы создать и еще более мощные двигатели, но уже трудно сделать винт, который развивал бы соответствующую тягу и был бы экономичным.

На таких больших самолетах, как ТУ-114, ИЛ-18, АН-10, установлены турбовинтовые двигатели. При скорости полета около 800 *км/час* они экономичнее, чем чисто реактивные.

Воздушно-реактивные двигатели создают тягу, отбрасывая назад воздух, взятый из окружающей среды (он же одновременно служит и окислителем при горении топлива). Но с увеличением высоты полета плотность окружающего воздуха уменьшается. Все меньше его проходит через двигатель, тяга падает. От этого недостатка свободны ракетные двигатели (рис. 12), для работы которых нужно иметь запасы и горючего и окислителя. Тяга здесь создается отбрасыванием назад продуктов горения и практически не зависит от окружающей среды.

Ракетные двигатели могут работать на твердом топливе (порох) и на жидком топливе (см. цвет. рис. у стр. 65). Двигатели на жидком топливе несколько более экономичны, но требуют очень осторожного обращения, так как и топливо, и окислитель обычно ядовиты; в качестве окислителя, например, часто потребляется крепкая азотная кислота.

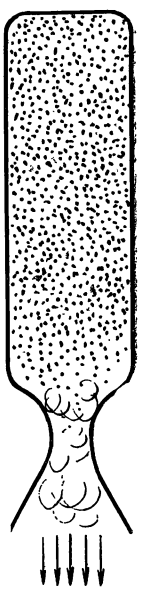


Рис. 12. Схема ракетного двигателя.

Устройство ракетного двигателя много проще, чем турбореактивного. В нем нет никаких вращающихся деталей. Поэтому он во много раз легче, чем двигатели других типов, которые могут развивать такую же тягу. Но зато в полет надо брать много топлива и окислителя — по весу в 15—18 раз больше, чем для турбореактивного. Если бы мы захотели, например, на сверхзвуковой самолет, весящий 50 *т*, поставить ракетный двигатель вместо турбореактивного, то на один час полета потребовалось бы не 10 *т* топлива, а 150—180 *т* (вместе с окислителем). Это более чем в три раза превышает массу самого самолета!

На самолетах ракетные двигатели используются только как вспомогательные — для

◀ Гиперзвуковые самолеты недалекого будущего. ■

кратковременных полетов на очень большой высоте или для быстрого взлета. Широко ракетные двигатели применяются на ракетах, где тяга создается на короткое время: для быстрого разгона зенитной ракеты, для подъема и разгона баллистических ракет, для запуска спутников, для разгона и торможения космических кораблей. Ракетный двигатель позволяет получить очень большую тягу. Уже сейчас для запуска космических кораблей создают двигатели с тягой в несколько сот тонн, или миллионы ньютонов!

На тех же принципах, что и воздушно-реактивные и ракетные двигатели, будут, очевидно, построены и двигатели будущего. Ученые уже думают о реактивных двигателях, в которых воздух будет нагреваться не горением керосина или другого химического топлива, а с помощью управляемой ядерной реакции, подобно тому как нагревается теплоноситель на атомных электростанциях. Разрабатываются **ионные** двигатели. Они тоже будут работать по реактивному принципу, но в этих двигателях будет отбрасываться не струя газа, а поток ионов. Подумывают ученые и о **фотонных** двигателях, в которых силу тяги создает отраженный луч света очень большой силы и интенсивности.

## КАК ВЫБИРАЮТ РАЗМЕРЫ САМОЛЕТА

Чтобы создать самолет, мало знать, как сделать крыло с достаточной подъемной силой и малым сопротивлением и каким должен быть двигатель. При постройке самолета встает множество других важнейших вопросов. Надо правильно выбрать соотношение веса машины и размеров крыла. Надо обеспечить управление самолетом — возможность изменять направление и скорость полета. Самолет в полете должен быть устойчивым, резкая перемена его положения при малейшем порыве ветра недопустима. Самолет должен быть прочным, но не слишком тяжелым. Надо, наконец, дать возможность летчикам определять направление полета и узнавать место, где пролетает самолет. Кстати, на заре авиации случалось, что летчик должен был для ориентировки снижаться и на большой скорости читать название железнодорожной станции.

Одним словом, очень и очень многое надо учесть и предусмотреть конструкторам, чтобы построить самолет безопасный, экономичный и удобный для пилотирования. Широко известны имена наших авиаконструкторов А. Н. Туполева, С. В. Ильюшина, А. И. Микояна, А. С. Яковлева, О. К. Антонова, под руководством которых строятся замечательные самолеты.

С чего же начинается проектирование самолета? Прежде всего надо точно определить его назначение и исходя из этого решить, каковы должны быть скорость и высота полета, какой груз поднимет самолет и какое расстояние он должен пролетать. Затем можно приступать к выбору размера самолета; главная его характеристика — площадь крыла.

После взлета по мере увеличения скорости полета самолет должен уменьшать угол атаки крыла, чтобы подъемная сила оставалась равной весу (рис. 13). Аэродинамическое сопротивление самолета при этом будет постепенно уменьшаться. Минимальным оно станет при том угле атаки, который соответствует максимальному аэродинамическому качеству (этот угол атаки, как мы уже говорили, равен 3—5°).

Дальнейшее увеличение скорости требует еще меньших углов атаки, но оно начнет также и увеличивать сопротивление. Конструкторы нашли выход — в этом случае можно уменьшить площадь крыла. Но тогда на каждую часть его площади придется бóльшая часть веса машины. И теперь, чтобы оставить подъемную силу равной весу самолета, нужно вновь увеличить угол атаки. В результате аэродинамическое сопротивление опять уменьшится; оно должно быть минимальным на основной скорости полета.

Таким образом, подбирается так называемая **удельная нагрузка на крыло** — масса (вес) самолета, приходящаяся на 1 $м^2$ крыла. Эта величина у сверхзвуковых самолетов достигает 8000 $н/м^2$, у тихоходных самолетов — 1200 $н/м^2$, а у летающих с небольшой скоростью моделей — всего несколько десятков ньютонов на квадратный метр.

Необходимо учесть также, что взлетная и посадочная скорости самолета должны быть как можно меньше. А для этого в свою очередь выгодна небольшая удельная нагрузка на крыло, т. е. надо увеличить площадь крыла. И вот конструктору приходится решать вопрос, какую же площадь крыла выбрать для самолета: сделаешь небольшое крыло — придется взлетать и садиться на большой скорости; сделаешь большое крыло — нужен более мощный двигатель и самолет не будет экономичным.

Ученые и инженеры стремятся уменьшить взлетно-посадочную скорость самолетов, летающих с большой скоростью. Для этого можно,

например, изменять в момент посадки или взлета форму и профиль крыла. Наиболее распространенный вид такой, как ее называют, «механизации» крыла — установка **закрылков**. Отклонение их перед взлетом или посадкой увеличивает подъемную силу крыла и позволяет несколько уменьшить взлетно-посадочную скорость.

Но все равно у современных скоростных самолетов эти скорости намного больше, чем у старых, тихоходных. Например, у широко известного тихоходного самолета ПО-2, применяемого в сельском хозяйстве, взлетно-посадочная скорость всего 60 *км/час*. Современные же сверхзвуковые самолеты взлетают при скорости около 300—400 *км/час*, а приземляются — при 200—300 *км/час*. Посадочная скорость в данном случае меньше потому, что самолет садится почти без горючего.

На большой высоте плотность воздуха сильно уменьшается. Поэтому, чтобы крыло сохраняло свою подъемную силу, нужно увеличивать скорость полета. Летать высоко — это значит летать быстро. Максимальная высота полета, таким образом, зависит в значительной мере от скорости.

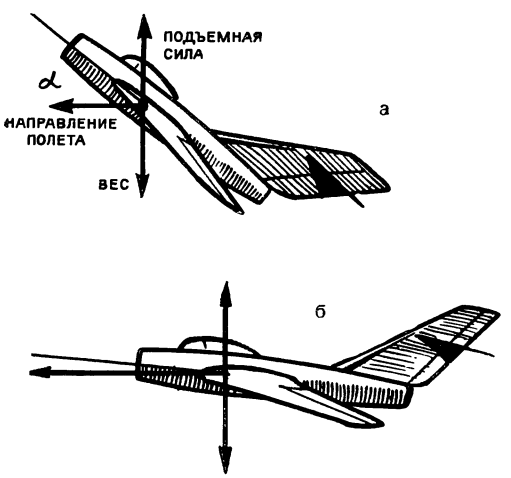



**Рис. 13. При увеличении скорости самолет должен уменьшать угол атаки: *а* — малая скорость, *б* — большая скорость.**

Практически только на сверхзвуковых скоростях самолет может достичь высоты 20—25 *км*. Для этого нужны очень мощные двигатели, тяга которых на большой высоте достаточна, чтобы создать необходимую подъемную силу.

Современные сверхзвуковые самолеты с реактивными двигателями летают на высоте 20—22 *км*; в специальных полетах лишь на очень короткое время они могут достигнуть 40 *км*. На еще большую высоту поднимаются исследовательские самолеты с ракетными двигателями. Сами они не стартуют с земли—их поднимают на 10—12 *км* тяжелые самолеты-матки. Ракетный двигатель включается после отделения от самолета-матки. Такой двигатель дает самолету возможность на короткое время подняться на высоту около 100 *км* и развить скорость около 6000 *км/час*.

Размеры и вес самолета проектируются тем большими, чем больше груза должен он поднимать и чем дальше должен летать. У самолета-истребителя дальность полета не более 3 тыс. *км*. Он поднимает мало груза и поэтому весит сравнительно немного — обычно не больше 10 *т*. Вес дальних бомбардировщиков и больших пассажирских самолетов достигает 100 *т*.

## КАК УПРАВЛЯЮТ САМОЛЕТОМ

Управлять самолетом — это значит изменять его положение в полете или противодействовать порывам ветра. Для этого используют как опору окружающий его воздух. Предположим, что летчику нужно вывести самолет из горизонтального положения так, чтобы левое крыло оказалось ниже правого. Такое положение называется креном влево. Для этого служат **элероны** — отклоняющиеся рули на крыле (рис. 14). Если элерон на правом крыле отклонить вниз, увеличивая подъемную силу этого крыла, и одновременно отклонить вверх элерон левого крыла, самолет накренится влево.

Для управления по курсу (вправо, влево) служит р у л ь н а п р а в л е н и я. Он находится на вертикальном хвостовом оперении (на киле). А для продольного управления (вверх, вниз) служит р у л ь в ы с о т ы, расположенный на горизонтальном оперении. Для хорошего управления нужно, чтобы все рули были размещены как можно дальше от центра тяжести самолета. Поэтому элероны располагают на концах крыльев, а рули высоты и направления — на хвосте.

Рулем направления летчик управляет, нажимая на педали. Нажал педаль под правой ногой — и руль направления принимает положение, при котором самолет повернет в правую сторону. Элероны и руль высоты присоединены к одному рычагу — к **ручке управления**. Если летчик потянет эту ручку на себя, рули высоты отклонятся вверх. На хвосте возникнет аэродинамическая сила, направленная вниз, которая и заставит самолет увеличить угол атаки. Если

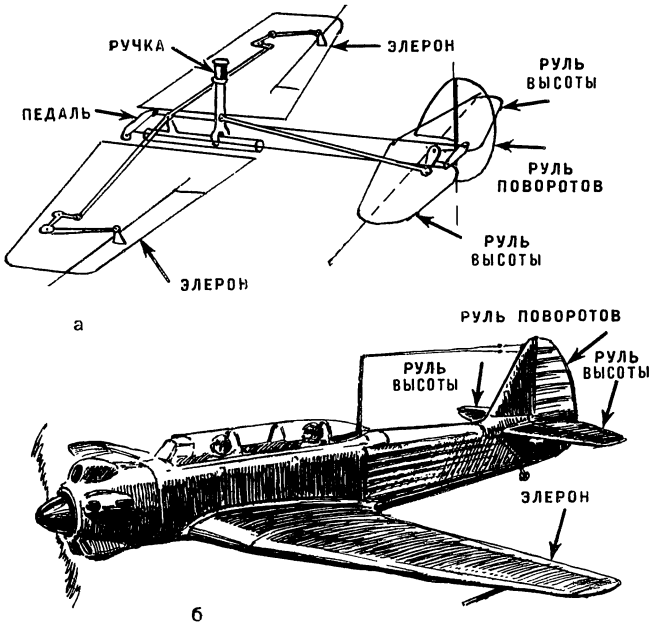



**Рис. 14. Органы управления самолетом.**

же летчик переместит ручку управления влево, то отклонятся элероны и самолет начнет крениться влево. Ручку управления летчик держит правой рукой, а левой управляет тягой двигателя и множеством различных приборов.

На большом самолете, которым управляет не один летчик, а целый экипаж (летчик, бортинженер, радист, штурман), за приборами и двигателем есть кому смотреть, а летчик управляет только самолетом. Вместо ручки управления на таком самолете часто ставят штурвал, похожий на «баранку» в автомобиле.

На сверхзвуковых или больших дозвуковых самолетах у летчика не хватит силы, чтобы самому отклонять рули. Тогда в проводку управления встраивают специальные с е р в о м о т о р ы. Они-то и отклоняют рули, а летчик лишь вводит их в действие. Чаще всего такой механизм представляет собой цилиндр, в котором масло под большим давлением (около 200 *атм*) перемещает поршень, связанный с каким-либо из рулей.

Такой механизм называется бустером, а управление этого типа — **бустерным**. Тяга сервомотора достигает нескольких тонн, или десятков тысяч ньютонов, потребляемая мощность — нескольких десятков киловатт.

Летчику приходится управлять рулями не только для того, чтобы совершить какой-нибудь маневр. Даже если самолет летит прямо, руль высоты, например, должен быть отклонен. Из механики известно, что для равновесия всякого тела необходимо, чтобы равнодействующая всех сил, действующих на тело, а также момент этих сил равнялись нулю. Подъемная сила крыла уравновешивает вес самолета, тяга двигателя — сопротивление, а момент подъемной силы на хвостовом оперении должен уравновешивать момент подъемной силы крыла относительно центра тяжести самолета (рис. 15).

Чем дальше в самолете расположен центр тяжести от точки приложения подъемной силы крыла, тем большая нужна подъемная сила на оперении. Может возникнуть мысль: а если расположить центр тяжести самолета как раз в том месте, куда приложена аэродинамическая подъемная сила? Ведь тогда управлять самолетом будет очень легко. Оказывается, так поступить нельзя. Это опасно.

## УСТОЙЧИВОСТЬ САМОЛЕТА

Бывало так, что самолет не мог совершать полет. Вот он быстро разбежался по аэродрому и ушел в воздух. Но вместо того чтобы плавно набирать высоту, он начинает проделывать непонятные маневры. Будто неведомая сила резко бросает самолет то вверх, то вниз. И летчику нужны мужество и мастерство, чтобы приземлиться обратно на аэродром. Чтобы уяснить, почему такой случай возможен, следует познакомиться с очень важным понятием у с т о й ч и в о с т и д в и ж е н и я.

Про шарик, подвешенный на нитке, можно сказать, что он висит устойчиво. При этом мы подразумеваем, что, если шарик отклонить, он сам вернется в прежнее устойчивое положение. А вот карандаш поставить на стол торцом не так-то просто. При слабом дуновении воздуха карандаш упадет—его положение неустойчиво.

Понятие устойчивости можно распространить и на движение любого тела, в том числе и

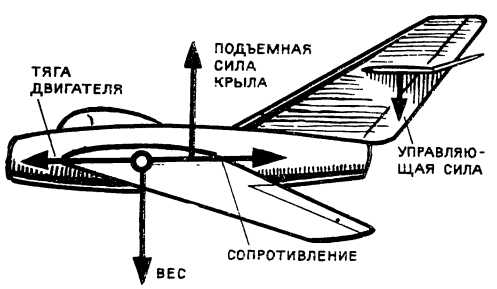



**Рис. 15. Схема сил, действующих на самолет в полете.**

самолета (математическая теория устойчивости движения была разработана А. М. Ляпуновым). Движение, в том числе и полет самолета, называют устойчивым, если, например, при порывах ветра машина сама, без вмешательства летчика, стремится сохранить свое прежнее движение. Для этого нужно, как показано на рисунке 15, расположить центр тяжести впереди от аэродинамического фокуса самолета, т. е. той точки, где приложена суммарная подъемная сила при изменении угла атаки. Тогда, если по каким-нибудь причинам самолет увеличил свой угол атаки (например, снизу подул ветер), подъемная сила сначала увеличится и самолет начнет подниматься. Но это же увеличение подъемной силы создает момент относительно центра тяжести в ту сторону: и без вмешательства летчика угол атаки самолета опять уменьшится до прежней величины.

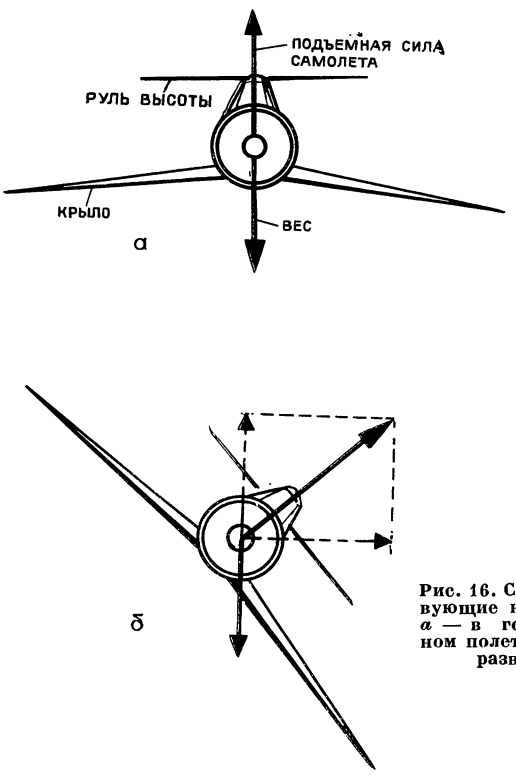



**Рис. 16. Силы, действующие на самолет: *а* — в горизонтальном полете, *б* — при развороте.**

Горизонтальное оперение можно поместить и спереди (такая схема самолета называется «уткой»), а крыло при этом сдвинуть назад. Но вертикальное оперение для устойчивости необходимо размещать на хвосте. Так же устроен, например, и воздушный змей: роль вертикального оперения играет у него веревочный хвост. А без хвоста змей и летать не будет.

Когда самолет устойчив и хорошо управляем, он может легко и безопасно совершать различные маневры. Простейший маневр — это **разворот**, или **вираж**. Летчик накреняет самолет в сторону поворота, например влево, и проекция подъемной силы будет разворачивать самолет в ту же сторону (рис. 16). Но чтобы самолет при этом не опустился вниз, надо увеличить подъемную силу. Летчик одновременно с отклонением ручки управления влево тянет ее на себя и тем самым увеличивает угол атаки.

При этом летчик почувствует, что его сильно прижимает к сиденью. Иными словами, он испытает **перегрузку** (перегрузкой называется отношение действующей на летчика или самолет силы, исключая силу тяжести, к силе их тяжести). Чем интенсивнее разворот, тем больше требуется угол крена и тем больше перегрузка. В горизонтальном полете перегрузка равна единице, при угле крена в 60°—2, при 70° — 3, а при 80° — уже 6! Перегрузки возникают при любом маневре самолета, если при этом изменяется подъемная сила, т. е. возникает ускорение. Для легких маневренных самолетов максимальная перегрузка — 10, а для тяжелых или пассажирских — около 2. Тренированный летчик длительное время легко переносит перегрузку, равную 5, а если она действует доли секунды, то до 15 и даже 20. На беспилотных ракетах допускаются большие перегрузки. Поэтому самолету трудно увернуться от зенитной ракеты.

Легкие самолеты могут совершать много **фигур высшего пилотажа** (см. цвет. рис. у стр. 72). Высший пилотаж зародился в 1913 г., когда русский летчик Нестеров и французский пилот Пегу почти в один и тот же день выполнили **«мертвую петлю»**, или, как ее теперь называют, петлю Нестерова. Когда скорость самолетов была небольшой, высший пилотаж применяли не только для спорта или тренировки летчика, но и в воздушных боях между истребителями. Но с повышением скорости сильно возрастает радиус разворота. При скорости 500 *км/час* радиус разворота около 600 *м*, а при скорости 1800 *км/час* уже около 8 *км*. При таком развороте легко потерять из виду противника.

Наиболее опасная фигура высшего пилотажа — **«штопор»**. Угол атаки при «штопоре» доходит до 50°. Плавное обтекание крыла и оперений нарушается, и отклонение рулей малоэффективно. Поэтому вывести самолет из «штопора» иногда бывает очень трудно.

## ПРОЧНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Каждый тип самолета должен пройти в специальных лабораториях испытания на прочность. Если самолет выдерживает нагрузку больше расчетной, это... очень плохо: конструкцию надо облегчить, чтобы самолет мог брать больше горючего или груза.

Очень важно поэтому знать, какие нагрузки в полете будут действовать на самолет. Эти нагрузки будут больше, если самолет должен выполнять различные маневры. Но даже тяжелые, неманевренные самолеты должны выдерживать порывы ветра, скорость которых на высоте около 11 *км* иногда достигает 200 *км/час*.

Самолет может разрушиться в воздухе не только от порыва ветра. Ведь конструкция самолета не может быть, как говорят специалисты, абсолютно жесткой, и при определенных воздействиях он деформируется. А при деформациях, например, крыла изменятся и аэродинамические силы. На большой скорости и при неправильной конструкции изменения аэродинамических и инерционных сил могут вызвать очень опасные колебания, которые за несколько секунд способны разрушить самолет. Такое явление называется ф л а т т е р о м. Предотвращение флаттера—трудная и сложная задача.

Пилотируя самолет, летчик должен быть уверен, что двигатель и все другие основные системы работают нормально, что самолет находится в правильном положении, что скорость полета вполне допустима. Только тогда полет будет безопасным. Этому помогают различные пилотажные приборы и специальные автоматические системы управления. Самые важные из пилотажных приборов — указатель скорости, махметр, высотомер, авиагоризонт, компас. (Подробно об устройстве этих приборов и автопилоте рассказано в ст. «Техника помогает водить самолеты» в т. 5 ДЭ.)

Действия летчика в полете должны быть точными и быстрыми. Поэтому перед тем, как лететь на новом самолете, летчик много часов проводит в кабине, тренируясь в управлении. Для такой тренировки существует даже специальное устройство — т р е н а ж е р. Он состоит из кабины самолета, электрической счетной машины и экрана с проектором (рис. 17). Сигналы при отклонении рычагов управления подаются в счетную машину, которая определяет, как при этом должен двигаться самолет. По сигналам счетной машины изменяются показания приборов и одновременно изменится изображение на экране. Если, например, летчик потянет ручку управления на себя, то сразу изображение горизонта на экране начнет опускаться, как будто действительно самолет увеличил свой угол атаки. Изображение на экран дается через подвижный проектор или с помощью телевизионной установки.

Однако, как бы хорошо ни был подготовлен летчик, при больших скоростях ему очень трудно уследить за показаниями всех приборов. Чтобы облегчить ему пилотирование, особенно при длительных полетах, применяют автопилоты. Современные самолеты оснащены очень сложными и совершенными а в т о п и л о т а м и, которые позволяют хорошо летать даже на малоустойчивом самолете, надежно осуществлять посадку в тумане и т. д.

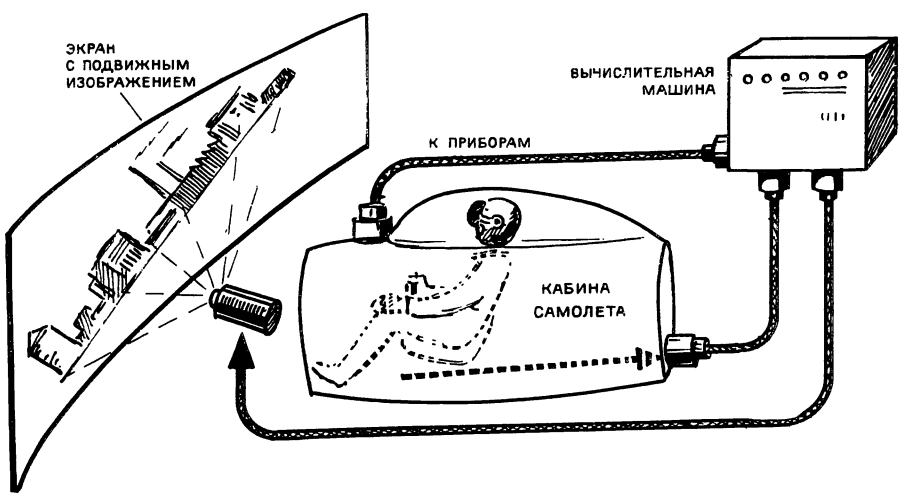



Рис. 17. Схема тренажера (установки для тренировки летчика на земле).

## КРЫЛАТЫЕ РАКЕТЫ

Крылатые ракеты в принципе полета ничем не отличаются от самолетов, только они летают без летчика. Используют такие ракеты главным образом для военных целей, как для обороны, так и для наступления. Строятся и специальные ракеты для исследований условий полета на больших, еще не освоенных скоростях или высотах. Результаты полета таких ракет дополняют исследования в аэродинамических трубах.

Иногда ракету трудно отличить по виду от самолета.

У крылатой ракеты могут быть и четыре крыла, расположенные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Это делается для того, чтобы маневр ракеты можно было совершать без крена. Ракеты могут стартовать как с земли (рис. 18), так и с самолета (рис. 19). В зависимости от назначения различают ракеты «воздух—воздух», «земля—воздух», «воздух—земля», «воздух—вода» и т. п. Например, ракета **«земля — воздух»** стартует с земли и предназначена для поражения воздушных целей (самолетов или ракет противника). Ракета **«воздух — земля»** стартует с самолета и поражает цель на земле. Ракеты управляются автоматически; наводят их на цель обычно с помощью радиолокатора. Чтобы достигнуть большой скорости (до $M = 6$), на ракетах устанавливают воздушно-реактивные или ракетные двигатели (см. ст. «Полет в космосе»).

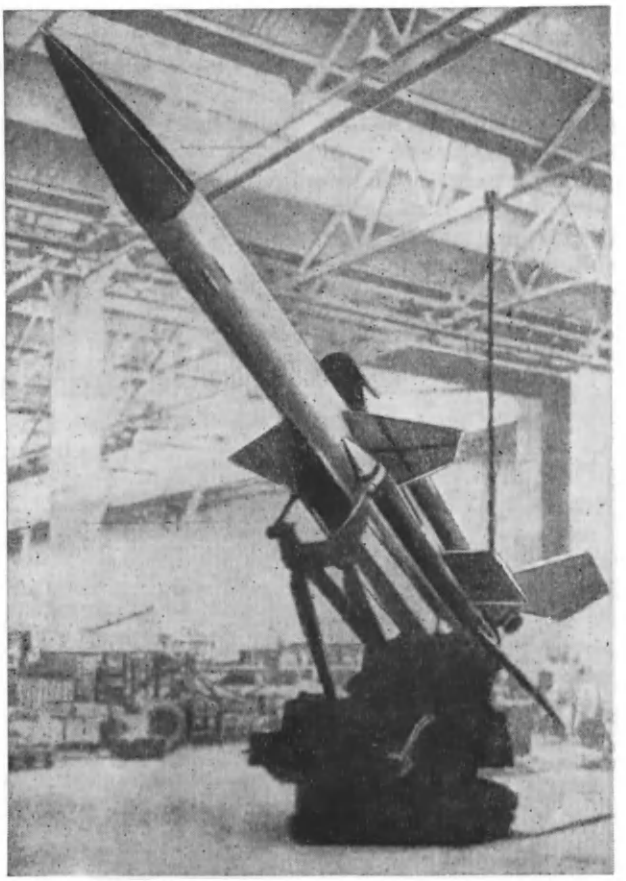


Рис. 18. Ракета «земля—воздух» на стартовой установке.

## ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ АВИАЦИИ

Пока что только военные самолеты летают быстрее звука. Но уже в самом скором времени будут созданы и пассажирские сверхзвуковые самолеты со скоростью полета до 2000 и даже 3000 *км/час*. Представьте себе, как сократятся тогда расстояния! Ехать из Хабаровска в Москву на поезде нужно больше недели; на воздушном лайнере ТУ-114 этот путь занимает 8 часов, а сверхзвуковой самолет сможет пройти его всего за 3 часа.

Если лететь с востока на запад, то при полете на сверхзвуковом самолете можно «обогнать» время. Если бы мы вылетали из Хабаровска на таком самолете сразу после встречи Нового года, скажем в час ночи, когда в Москве 7 часов вечера, то в столицу мы прибыли бы в 10 часов вечера прошедшего года. Одним словом, мы смогли бы встретить Новый год дважды.

Самолеты, особенно тяжелые сверхзвуковые, требуют для взлета и посадки специальных аэродромов с длинными (3—4 *км*) бетонными взлетно-посадочными полосами. Строительство таких аэродромов обходится очень дорого, а в горных районах, например, практически вообще невозможно. Поэтому будущие самолеты должны иметь возможность взлетать и садиться либо вертикально, либо на маленьких аэродромах. Такого типа опытные самолеты уже построены. На них устанавливаются или дополнительные вертикально расположенные дви-

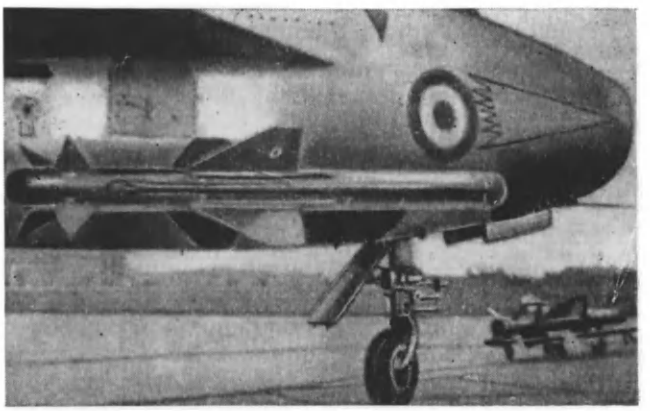


Рис. 19. Крылатая ракета «воздух—воздух», подвешенная на самолете.

татели, или специальные устройства для поворота струй от основных двигателей вниз.

Авиационная техника будет развиваться и еще дальше. Уже сейчас разрабатываются проекты **гиперзвуковых воздушно-космических самолетов**. Такой самолет будет обладать скоростью, соответствующей числу $M = 5$, даже 10 и более, и сможет «выпрыгивать» из атмосферы Земли. При входе в атмосферу самолет «отскочит» от нее, подобно плоскому камню, брошенному вдоль поверхности воды, облетит вокруг Земли, войдет в атмосферу и выберет место посадки.

Такой самолет может быть и последней ступенью ракеты, которая возвращается на Землю после дальнего космического полета. Но чтобы создать самолет такого типа, нужно решить еще много проблем, и первая из них — преодолеть «тепловой барьер», с которым мы познакомились в начале статьи.

■

# ЧЕЛОВЕК ПОКОРЯЕТ ОКЕАН

Каравелла Колумба «Санта-Мария».

Более двух третей поверхности Земли занимают моря и океаны, бесчисленные реки, озера. Мировой океан более миллиарда лет назад стал колыбелью жизни на Земле. Для тысяч видов животных вода — их родная стихия: для рыб, моллюсков и даже млекопитающих, например кита, дельфина, моржа.

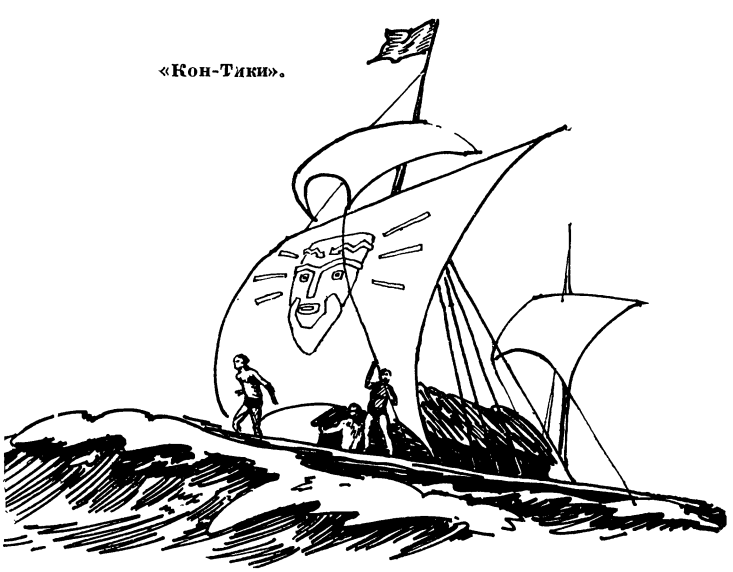
После миллионов лет эволюции из океана вышли на сушу земноводные. От них и произошел наиболее совершенный класс животного мира — млекопитающие, среди них и человек. Но увы... Это «высшее творение природы», пройдя миллионнолетний путь развития, утратило среди лесов и гор свои связи с водной стихией. Человеку, ставшему хозяином Земли, вновь пришлось научиться плавать; без этого он не мог бы свободно передвигаться даже в пределах одного материка...

Окружавшее материки безбрежное море манило его своей таинственностью. И человек научился преодолевать тысячекилометровые водные пространства: опираясь на силу своего разума, он научился плавать. Сначала инстинктивно, а потом сознательно он познавал законы природы, позволившие ему совершать этот подвиг.

Надо ли подробно рассказывать о значении плавания в жизни человека. Достаточно сказать, что благодаря этому умению человечество расселилось по Земле, по всем ее материкам.

## ТАЙНА ОСТРОВА ПАСХИ

Европейские путешественники, впервые попавшие в XVIII в. на затерянный в Тихом океане о-в Пасхи, обнаружили там колоссальные каменные статуи, изображавшие людей или богов. Вес некоторых из этих изваяний достигал 20 *т*. У людей, живших на острове, хранились дощечки с письменами, но никто из них не умел прочесть, что там было написано. Было непонятно и кто писал на этих дощечках, и кто установил статуи. А еще таинственнее было то, что статуи, очень похожие на изваяния о-ва Пасхи, были обнаружены за тридевять земель от него — в Южной Америке, в Перу. Некоторые ученые даже высказали предположение, что статуи и на о-ве Пасхи и в Перу установил один и тот же народ. Но население острова стояло на очень низком культурном уровне, лодок, пригодных для плавания по океану, у них не



«Кон-Тики».

было, а до перуанского берега от о-ва Пасхи 4000 *км*. Как же люди перебрались через океан?

Норвежский ученый Тур Хейердал решил доказать, что и много веков назад люди могли переплывать океан. Он отправился в Южную Америку и построил там плот — точную копию древних перуанских плотов: девять толстых бревен из бальзовых деревьев, связанных веревками; на плоту были бамбуковая хижина, четырехугольный парус, и рулевое весло на корме. У полинезийцев сохранилось предание, что некогда через океан приплыл с востока на плоту легендарный вождь островитян Кон-Тики. В честь его Хейердал и пять его товарищей назвали свой плот «Кон-Тики».

Более трех месяцев продолжалось путешествие шести отважных исследователей. Около 8000 *км* проплыли они на плоту и доказали высокие мореходные качества древнего перуанского корабля. Об этом плавании Хейердал рассказал в своей увлекательной книге «Путешествие на «Кон-Тики».

О том, когда и как люди научились плавать на плотах и лодках, можно только догадываться. К разным народам это умение пришло, очевидно, в разное время и при различных обстоятельствах. Почти все животные умеют плавать, но иногда они предпочитают пользоваться плывущим мимо них предметом.

Человек, не умеющий плавать, попав в воду, инстинктивно стремится ухватиться за что-нибудь. Плывущее дерево для него — спасительная поддержка, а деревья, случайно сцепившиеся ветвями, — уже надежная опора. Возможно, что где-нибудь так и началось плавание на плотах. Люди научились плавать верхом на дереве, оседлав его, как коня. Если в таком дереве было большое дупло, человек мог плыть более удобно: его ноги оставались сухими, а шестом он отталкивался от дна или от плывущих рядом деревьев. Возможно, так он и пришел к долбленой лодке и к веслу.

## КАК ЖИДКОСТИ ВСТРЕЧАЮТ «ГОСТЕЙ»

Погрузим под воду кусок пробки. Стоит только отнять руку, как вода вытолкнет его на поверхность. Но так будет не с каждым предметом. Недаром говорят: «Пошел камнем на дно». Действительно, камень или, скажем, металлический ключ сразу пойдут на дно. Но можно доказать, что жидкость выталкивает

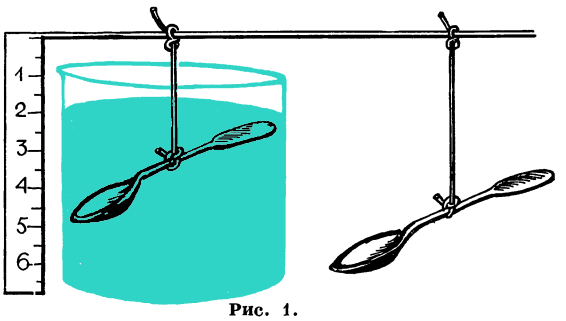


Рис. 1.

вверх и те тела, которые в ней тонут, да только не удается ей это: не хватает у нее силы, чтобы их вытолкнуть.

Привяжем к металлической ложке тонкую резиновую нить, как показано на рисунке 1, и измерим длину резинки. Затем опустим ложку в сосуд с водой. Снова измерив теперь длину резинки, мы убедимся, что нить стала короче. Значит, вода выталкивает ложку вверх.

Силу, которая выталкивает тело из жидкости, называют **выталкивающей** или **поддерживающей**. Пробка плавает на поверхности воды, словно ее кто-то поддерживает. Резинка стала в воде короче — как будто что-то выталкивает ложку снизу.

Куда же направлена выталкивающая сила? Резиновая нить, к которой подвешена ложка в воде, укорачиваясь, сохраняет свое отвесное положение и не отклоняется в сторону. Если короткой ниткой привязать к пробке груз и опустить его на дно, нить натянется строго отвесно (рис. 2). Это показывает, что выталкивающая сила, действующая на пробку, направлена вертикально вверх.

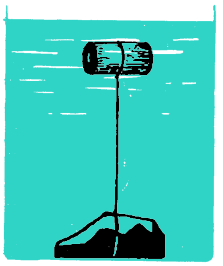


Рис. 2.

Почему больно лежать на морской гальке на берегу и не больно, погрузившись в море? Почему тяжесть ведра с водой мы начинаем ощущать только с того момента, когда ведро показывается над поверхностью воды в колодце? Попробуйте сами ответить на эти вопросы.

## ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Жидкость давит на предмет, опущенный в нее, и снизу вверх, и сверху вниз, и в любом другом направлении. Но сила, с которой она давит, различна и зависит от того, насколько глубоко опущен предмет в воду. Деревянный брусок, опу-

щенный в море на метровую глубину, всплывет и останется таким же, но на дне океана давление воды изменит его свойства.

Ученые проделали опыт: на прочном тросе опустили глубоко в море металлическую клетку, внутри которой был положен кусок дерева. Когда клетку вынули на поверхность, оказалось, что колоссальное давление воды так сильно сжало кусок дерева, что он потерял способность плавать и тонул в воде. Недаром же человек, глубоко нырнувший, чувствует боль в ушах: вода давит на барабанную перепонку.

Давление внутри жидкости равно ее удельному весу ($d$), умноженному на высоту ее столба ($h$). Из этого следует, что в любой точке на одной и той же глубине давление в жидкости одинаково (рис. 3), и чем глубже, тем давление больше.

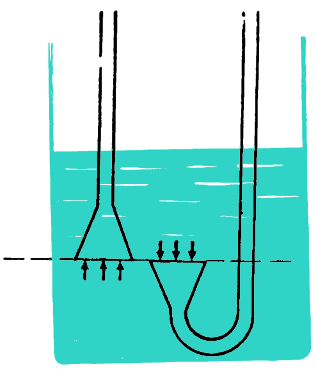


Рис. 3.

Если сравнить давления, создаваемые водой и ртутью, то окажется, что столб ртути давит в 13,6 раза сильнее, чем столб воды такой же высоты, так как удельный вес ртути в 13,6 раза больше удельного веса воды. Но в одной и той же жидкости, на одной и той же глубине при различных атмосферных условиях давление может быть неодинаковым. На высокой горе оно меньше, чем у поверхности моря. Ведь к давлению жидкости добавляется давление воздуха на ее поверхность.

Давление измеряют единицей *бар*. 1 *бар* = $=10^5$ *н/м*$^3$. На глубине 10 *м* вода создает давление: $P=dh=9800$ *н/м*$^3 \cdot 10$ *м* $=0{,}98$ *бар*. (Среднее атмосферное давление — 1,013 *бар*).

На рисунке 4 изображено несколько сосудов. Форма у них самая различная, неодинакова и площадь дна, но уровень воды, налитой в них, одинаков. Следовательно, давление жидкости на дно во всех этих сосудах одинаково. При первом взгляде на сосуды даже не верится этому. Однако это не так. Недаром это явление называется гидростатическим парадоксом [1].

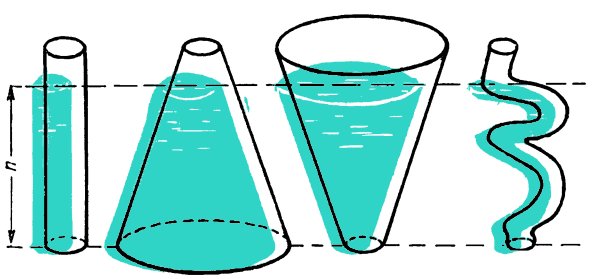



Рис. 4.

Рис. 5. Опыт Паскаля.

Не надо только путать давление с силой давления. Давление — это сила, действующая на единицу площади. Понятие же «сила давления» применяется ко всей площади дна в сосуде.

На рисунке 5 изображен опыт французского ученого Блеза Паскаля. В верхнем днище прочной деревянной бочки, доверху наполненной водою, он проделал узкое отверстие и плотно вставил в него длинную трубку. Когда Паскаль налил в трубку несколько кружек воды, давление воды разорвало бочку. Этот опыт наглядно показал, как можно небольшим количеством воды создать огромную силу давления у дна сосуда.

[1] Парадоксом называется утверждение, расходящееся с общепринятым мнением или такое, которое на первый взгляд кажется удивительным и нелепым, но оказывается справедливым.

## КАК ОБОЙТИСЬ БЕЗ ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ

В жидкость помещен куб (рис. 6). Давление на одной и той же глубине одинаково, поэтому силы давления, действующие на его боковые грани, уравновешиваются. Сила давления, действующая на верхнюю грань, меньше силы, действующей на нижнюю грань, потому что эти грани расположены на разной глубине,— чем глубже, тем давление в жидкости больше. Значит, равнодействующая всех сил, действующих со стороны жидкости на куб, направлена вертикально. Это и есть выталкивающая сила.

Для такого простого случая выталкивающую силу рассчитать нетрудно. Но если куб расположен в воде наклонно, рассчитать выталкивающую силу гораздо труднее. Если же у тела, опущенного в воду, неправильная форма, для расчета выталкивающей силы уже надо применить высшую математику.

Впрочем, можно найти более легкий и короткий путь. Возьмем себе в проводники знаменитого голландского математика и физика Стевина. В конце XVI в. вышла его книга, в которой дан простой и наглядный прием для определения выталкивающей силы. Позже этот прием, правда, в несколько измененном виде, стали называть **принципом отвердевания.**

Представим себе, что в сосуде с жидкостью какая-то часть ее неправильной формы затвердела, но вес этой части остался неизменным. «Затвердевшая» часть не всплывет и не опустится на дно. Следовательно, ее вес $P$ уравновешивается силой $F$, т. е. силой давления со стороны оставшейся жидкости (рис. 7,*а*).

Мысленно удалим «затвердевший» объем жидкости и вставим на его место твердое тело (из металла) точно такого же объема и формы (рис. 7,*б*). Жидкость будет «обманута». Ведь для нее ничто не изменилось, и она будет давить на это тело с такой же силой, как раньше давила на жидкость. Если у твердого тела вес

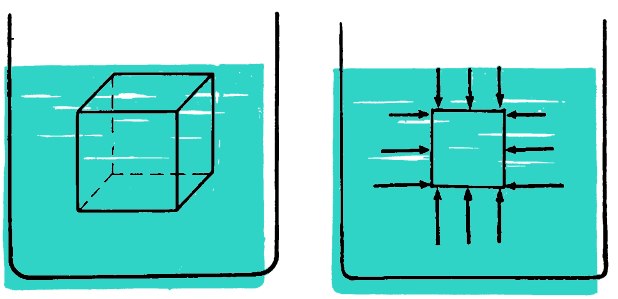


Рис. 6.

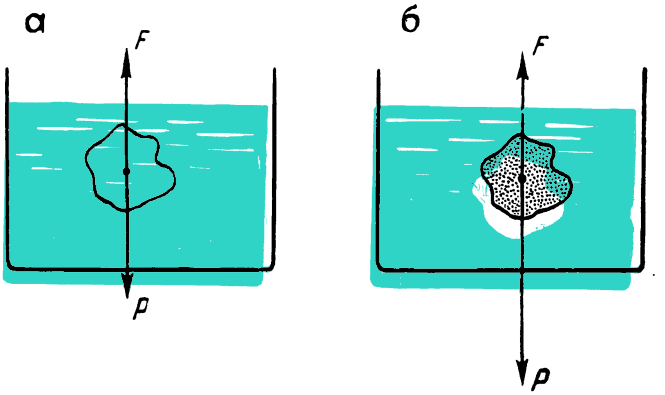



Рис. 7.

больше, чем у «затвердевшей» жидкости, то оно опустится на дно сосуда. Мы знаем, что в жидкости вес тела уменьшается. Он становится равным $P - F$.

Если же вес твердого тела меньше, чем вес «затвердевшей» жидкости, то выталкивающая сила будет больше, чем сила тяжести тела, и оно всплывет.

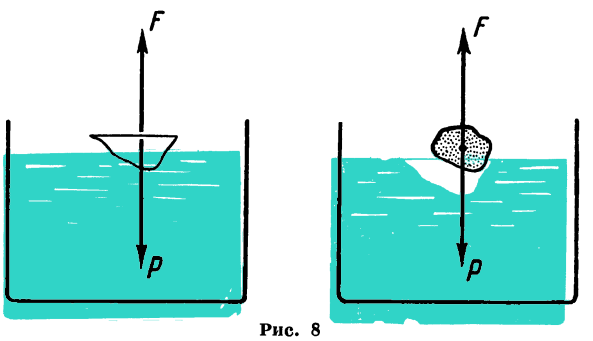



Рис. 8

Итак, если тело полностью погружено в жидкость, на него действует вертикально вверх выталкивающая сила, равная весу жидкости в объеме тела. На тело, частично погруженное в жидкость (рис. 8), действует выталкивающая сила, равная весу жидкости в объеме погруженной части тела.

Обычно обе эти формулировки объединяют в одну: на тело, частично или полностью погруженное в жидкость, действует вертикально вверх выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной телом. Этот закон называется законом Архимеда. Выталкивающая сила зависит не от наклона тела и не от его формы, а только от объема вытесненной им жидкости и от ее удельного веса.

В старинной восточной сказке рассказывается: «Царь обещал дать тому, кто взвесит его слона, столько золота, сколько весит сам слон. Бедняк перевозчик ввел слона в свою большую лодку и отметил уровень, до которого она погрузилась в воду. Затем он свел слона на берег и нагрузил лодку золотом до прежней отметки. Вес золота равнялся весу слона». Неграмотный лодочник, конечно, не знал закона Архимеда, но он сообразил: если у двух грузов одинаковый вес, они погрузят лодку в воду до одного и того же уровня.

## АРХИМЕД И ЕГО ОТКРЫТИЕ

Легендарные рассказы об исторических личностях, пусть и не всегда в точности соответствуют фактам, очень интересны и запоминаются на всю жизнь. О древнегреческом ученом Архимеде и его открытиях возникло много легенд. Вот одна из них.

Гиерон, завоевав царский престол в сицилийском городе Сиракузах, решил в благодарность за эту свою удачу принести в дар богам золотую корону. Он заказал ее мастеру и приказал отвесить ему нужное количество золота. Тот к назначенному сроку приготовил корону. Вес ее точно соответствовал весу отпущенного золота. Но царю донесли, что мастер частично подменил золото серебром. Гиерон разгневался, но, поскольку сам не мог найти способ уличить мастера, обратился за помощью к Архимеду.

Как рассказывают, Архимед сделал два слитка — один из золота, другой из серебра — каждый такого же веса, какой был у короны. Затем наполнил водой сосуд до самых краев, опустил в него серебряный слиток и отметил, сколько воды тот вытеснил.

То же самое он проделал и со слитком золота. Объем золотого слитка оказался меньше, чем у равного ему по весу слитка серебра. Затем Архимед опустил в сосуд корону: воды вытекло больше, чем от золотого слитка, и меньше, чем от серебряного. Сравнив три полученных объема вытесненной воды, Архимед рассчитал, сколько золота и сколько серебра пошло на изготовление короны. Так была доказана вина мастера.

Два обстоятельства важны в этой легенде. Во-первых, Архимед нашел способ измерять объемы твердых тел со сложной формой. Во-вторых, он сопоставил веса различных веществ не друг с другом, а с весом воды, т. е. впервые обратил внимание на свойство физических тел, которое мы теперь называем плотностью или удельным весом. Это само по себе было уже большим открытием. Работы Архимеда отличаются простотой и доступностью для понимания. Многие выведенные им законы легли в основу современной науки. Слава его недаром сохранилась до наших дней.

Архимед открыл три закона, которые стали основой науки о плавании тел:

1. Тела, имеющие при равном объеме равный с жидкостью вес, плавают, полностью погружаясь в жидкость.

2. Тела, более легкие, чем жидкость, при погружении в нее стремятся кверху с силой, равной разности между весом жидкости, взятой в объеме тела, и весом самого тела.

3. Тела тяжелее жидкости и опущенные в нее тонут. Пребывая в жидкости, они теряют в своем весе столько, сколько весит жидкость, взятая в объеме тела.

## ПЛАВАНИЕ — ЭТО РАВНОВЕСИЕ

Тело плавает, когда его вес уравновешен выталкивающей силой. Тело не тонет, не всплывает и может находиться в жидкости на любой глубине, так как плотность жидкости мало меняется с увеличением давления. Так плавают рыбы, морские животные, подводные лодки, батискафы, так может плавать и человек.

Вес плавающей рыбы в точности равен весу вытесненной ею воды. В любом живом организме до 90 и даже более процентов воды, так что его средняя плотность мало отличается от плотности воды.

Человеку, подводной лодке, кораблю плавать в воде помогает... воздух! Проведем несложный расчет. Плотность стекла, из которого сделана бутылка, равна 2,2 $г/см^3$; плотность воды — 1 $г/см^3$. Следовательно, стекло в воде пойдет ко дну. Но если стеклянная бутылка, наполненная воздухом, плотно закрыта пробкой, она будет плавать на поверхности воды. Масса стеклянной литровой бутылки равна примерно 0,5 *кг*; масса воздуха, заключенного в ней,— около 1 *г*, а средняя плотность закупоренной бутылки с воздухом — 0,501 $г/см^3$ $(\frac{501\ г}{1000\ см^3})$ ,т. е. вдвое меньше плотности воды.

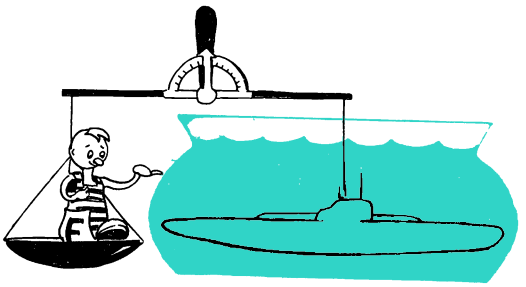
Налив в бутылку некоторое количество воды, мы можем сделать ее среднюю плотность в точности равной плотности воды. Такая бутылка сможет плавать в воде на любой глубине.

Средняя плотность бутылки, заполненной одним воздухом, меньше, чем плотность жидкости; она не может плавать на любой глубине и будет вытолкнута на ее поверхность. Объем ее погруженной в воду части уменьшается, так как часть бутылки окажется над водой. Поэтому и выталкивающая сила уменьшится и станет в точности равной весу бутылки с воздухом.

Подводная лодка плавает на любой глубине, не опускаясь и не поднимаясь, если ее средняя плотность равна плотности морской воды. Чтобы получить среднюю плотность подводной лодки, нужно сложить массы ее корпуса, двигателей, людей и воздуха, находящегося в ней, и разделить полученную сумму на объем, занимаемый лодкой.

Набрав в балластные цистерны воду, подводная лодка погрузится в глубину моря; ее средняя плотность станет больше плотности морской воды. Если же выдавить сжатым воздухом воду из балластных цистерн, подводная лодка всплывет. Объем подводной лодки всегда один и тот же. Она изменяет среднюю плотность, увеличивая или уменьшая свою массу, заполняя свои цистерны воздухом или водой. Запас сжатого воздуха всегда должен быть в подводной лодке, без него она не сможет поддерживать свою плавучесть и всплыть на поверхность воды.

Кроме того, подводная лодка не могла бы плавать под водой без так называемых горизонтальных рулей: даже самая незначительная разница между ее весом и выталкивающей силой гнала бы ее на дно или на поверхность. По-иному изменяет свою среднюю плотность «автономный» водолаз (запас сжатого воздуха он носит на спине в баллоне): если ему нужно всплыть, он надувает скафандр воздухом. Средняя плотность человеческого тела больше плотности воды, она равна 1,03 $г/см^3$. Плавучесть человеку обеспечивает воздух, набираемый им при вдохе в легкие.



При полном вдохе средняя плотность человеческого тела становится меньше плотности воды. При выдохе, когда тело теряет плавучесть, человеку приходится создавать подъемную силу движением рук. Искусство плавать — это умение правильно дышать, координируя вдохи и выдохи с движением рук и ног.

## ПЛАВАНИЕ ПОД ВОДОЙ

Наибольшая глубина в Мировом океане— 11 *км*. Подводные же лодки не могут опускаться ниже 250 *м*; их корпус не выдержал бы большое давление воды. Ведь на такой глубине на каждый квадратный сантиметр поверхности лодки давит сила примерно в 250 *н*. Давление здесь в 20 с лишним раз больше атмосферного. Образно говоря, подводная лодка движется только под самым «потолком» океана.

В еще худшем положении находится водолаз. Если его скафандр сделан из мягкой водонепроницаемой ткани, то внешнее давление воды передается через ткань на человека. Ниже 150 *м* он опуститься не может. Поэтому был создан жесткий скафандр. Он представляет собой как бы прочный футляр и защищает от давления воды. В нем водолаз дышит воздухом с нормальным атмосферным давлением. Водолаз внешне напоминает закованного в латы средневекового рыцаря. Такие скафандры дают возможность опускаться до 250 *м*, но они неудобны для работы под водой. Их используют главным образом для осмотра предметов, лежащих на дне. Сейчас необходимость в них уже миновала: для осмотра дна используют телевизионные камеры, погружаемые на дно.

Человек издавна мечтал «акклиматизироваться» в океане. В научно-фантастическом романе А. Р. Беляева «Человек-амфибия», написан-

Гонки подводного скутера и морской черепахи.

ном в 20-х годах, ребенку сделали операцию, после которой он мог дышать не только легкими, но и жабрами. На глазах у человека-амфибии были большие выпуклые очки, а одежда его состояла из сверкающей чешуи. В наши дни эта фантазия писателя уже близка к осуществлению. За последние годы большое развитие получило подводное плавание. Люди часами плавают под водой, изучая жизнь моря и его обитателей. На ногах у них резиновые ласты, глаза и нос закрыты водонепроницаемой полумаской, а во рту мундштук, соединенный с находящимся за спиной аппаратом с баллонами сжатого воздуха — аквалангом.

В переводе на русский язык «акваланг» — подводные легкие. Средняя плотность аквалангиста со всем его оборудованием очень близка к плотности воды. Изменяя объем воздуха в своих легких, аквалангист может в небольших пределах изменять свою плавучесть, т. е. подниматься или погружаться.

Аквалангисты спускаются под воду не только для исследования растительной и животной жизни океана, но и для подъема затонувших грузов, и для археологических работ. Плавание под водой и подводная охота на рыб стали новым видом спорта. Аквалангисты могут достигать глубин до 100 *м*.

Один из пионеров подводного плавания — француз Ив Кусто сконструировал подводный скутер, который может тянуть человека под водой со скоростью 10 *км/час*.

Подводное плавание дает возможность изучать «потолок» океана. Но человек стремится обследовать и его дно. Сначала он проник глубоко в океан в прочном металлическом цилиндре. Затем для глубинных исследований стали применять стальные шары — батисферы с иллюминаторами из толстого кварцевого стекла. В батисфере человек защищен от давления воды стальной броней.

В 1934 г. американским ученым Вильяму Бибу и Отису Бартону удалось опуститься в батисфере на глубину 923 *м*. Во время спуска они обнаружили новые виды рыб. С помощью батисфер были проведены многие интересные исследования. Однако у этих аппаратов есть большой недостаток: с кораблем они связаны тросом. Трос позволял батисфере передвигаться только по вертикали, а обрыв его неминуемо кончился бы гибелью исследователей.

Эти недостатки были преодолены, когда за изучение морских глубин взялся знаменитый исследователь стратосферы бельгийский профессор Огюст Пикар. Он сконструировал для погружения на большие глубины батискаф — подводный стратостат.

В батискафе исследователи и приборы находятся в стальной шарообразной гондоле; она укреплена под металлическим продолговатым «поплавком», который наполнен бензином. Плотность бензина — 0,8 *г/см*$^3$, поэтому такой «поплавок» дает подводному кораблю запас плавучести.

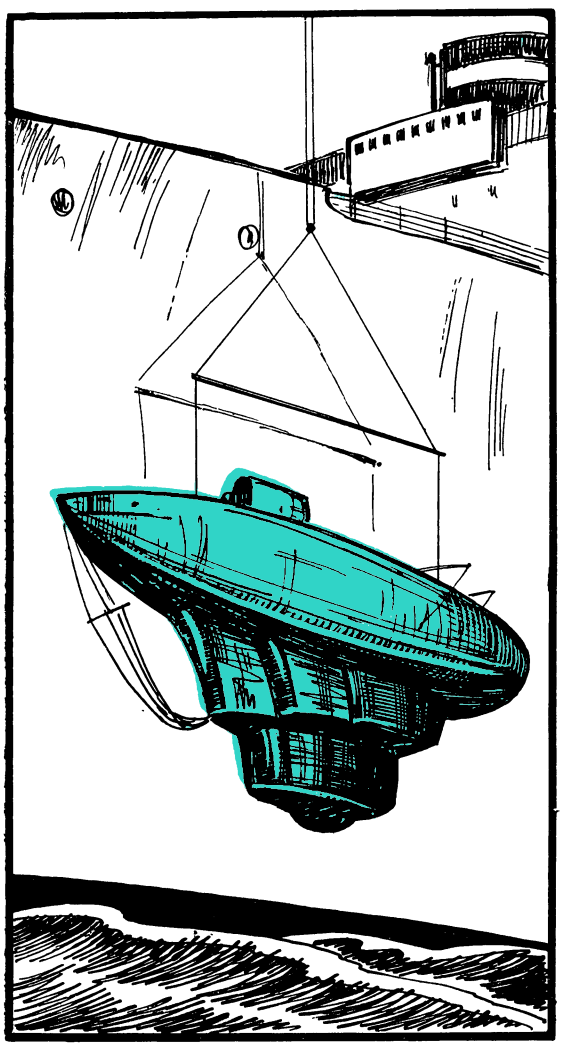
Если бы в «поплавке» батискафа был воздух, как, например, в цистернах подводной лодки, то на глубине в несколько километров его надо было бы защитить от громадного давления толстыми стальными стенками. Это снизило бы плавучесть. Бензин же почти несжимаем, как и вода, и тонкие стенки «поплавка» лишь не дают бензину растечься в воде. Для погружения батискафа использован балласт из стальных дробинок. Они удерживаются в спе-

циальной камере электромагнитом и могут быть мгновенно выброшены.

30 сентября 1953 г. батискаф, в котором находились Пикар с сыном, достиг глубины 3150 *м*. Исследователи пробыли под водой 2 часа 20 мин. и непрерывно вели киносъемку. На случай встречи с невиданными морскими чудовищами батискаф был снабжен глубоководной пушкой.

В другом батискафе, построенном во Франции по проекту инженера Вильяма, 15 февраля 1954 г. Гуо и Вильям установили новый рекорд погружения, опустившись на глубину 4050 *м*.

Сейчас усовершенствованные батискафы оснащены двигателем и винтами и могут уже самостоятельно передвигаться в любом направлении. В последние годы в батискафе достигли дна океана в Марианской впадине — в самом глубоком месте на Земле. Толща воды здесь достигает 11 000 *м*.



Батискаф, готовый к погружению.

В батискафе были сын Пикара Жак и американский моряк Дон Уолш.

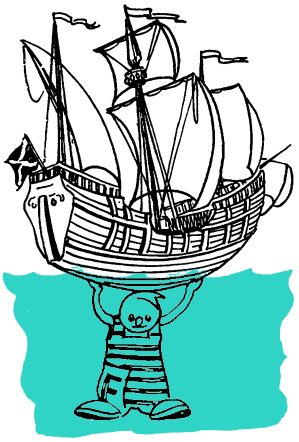
Может показаться, что на большой глубине, под колоссальным давлением в 800—1000 *атм* (1 *атм* = 1,013 *бар*), вода так сжата и вес ее в объеме батискафа так велик, что это помешает дальнейшему погружению. На самом деле не так. Ведь жидкости почти не сжимаются. Плотность воды на дне Марианской впадины лишь на 5% больше, чем у поверхности. Поэтому и выталкивающая сила мало меняется при увеличении глубины.

Это можно проверить на опыте. Для него нужен пластмассовый сосуд и мелкокалиберная винтовка. В сосуд наливается до половины его объема вода. Пуля, попавшая в верхнюю половину сосуда, проделает две аккуратные круглые дырки, и только. Выстрел в нижнюю часть сосуда разнесет его на части. Объяснить это можно так: пуля проходит через жидкость за очень короткое время; вода сжимается на величину объема пули, но не успевает подняться. Давление за это мгновение настолько возрастает, что сосуд разлетается на куски. Поэтому и подводная лодка гибнет, когда на некотором расстоянии от нее взрывается глубинная бомба. Практическая несжимаемость жидкости используется и в батискафе. Толщина стальных стенок у полой гондолы равна 9 *см*, а у бензинового «поплавка» — всего нескольким миллиметрам.

## ПЛАВАНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

У подводной лодки такелаж, нулевая плавучесть, т. е. ее средняя плотность, в точности равняется плотности воды. Чтобы нырнуть на дно, она должна уменьшить свою плавучесть, а чтобы подняться на поверхность — увеличить ее. У обычного надводного корабля должна быть положительная плавучесть, чтобы он мог нести свои надстройки, находящиеся под водой на одном и том же горизонтальном уровне, грузы и людей, не погружаясь в воду.

Почему плавает на поверхности воды дерево? Ведь плотность целлюлозы, из которой состоит древесина, выше плотности воды — 1,5 *г/см*$^3$. Помните описанный в начале статьи опыт, когда ученые подвергли деревянный брусок колоссальному сжатию и тот уже не смог плавать? Дерево плавает потому, что в нем есть воздух.



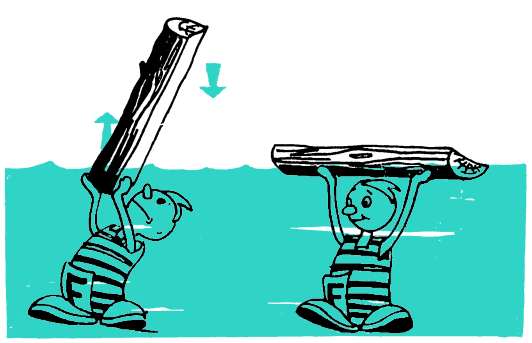
Давление воды вытеснило этот воздух, и дерево потеряло плавучесть. Намокшие стволы деревьев тонут в воде. Плот, сделанный из деревьев, обладает положительной плавучестью, пока он не намок. Хейердал и его спутники на «Кон-Тики» пережили немало тревожных дней, наблюдая, как намокают бальзовые бревна, из которых был сооружен их плот.

Лодки и корабли обладают положительной плавучестью потому, что вода не может проникнуть внутрь их корпуса. У корабля в воду погружено только его днище; вес вытесненной им воды как раз равен весу всего корабля, потому он больше не погружается в воду.

## УПРЯМОЕ ПОЛЕНО

Силу, действующую на какое-либо тело, можно представить приложенной к одной его геометрической точке. Так, например, сила земного притяжения (вес) приложена к центру тяжести тела. Выталкивающая сила тоже приложена к определенной точке — к так называемому **центру давления**. Эта точка находится в центре тяжести вытесненного телом объема жидкости.

Деревянный брусок, например обыкновенное полено, не может плавать стоймя. Сколько бы мы ни пробовали установить его вертикально, упрямое полено будет падать набок и плавать только плашмя. Как видно на рисунке 9, центр давления находится ниже центра тяжести. Стоит полену чуть отклониться от вертикали, как возникает пара сил, которая уводит его еще дальше от вертикального положения. Теперь нам стали понятными причуды упрямого полена. Оказывается, его поведение диктуется неумолимыми законами физики.



## ЦЕНТР ДАВЛЕНИЯ «ПУТЕШЕСТВУЕТ»

Полено, плавающее плашмя, находится в устойчивом равновесии, или, как говорят судостроители, обладает остойчивостью. Остойчивость должна быть и у корабля.

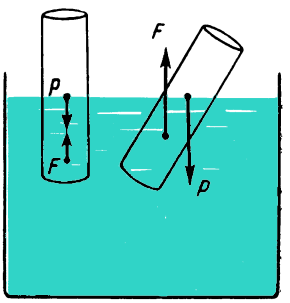



Рис. 9.

На рисунке 10 слева схематически изображен корабль, который от качки и от ветра накренился. Величина выталкивающей силы при этом не изменилась, так как объем погруженной части у правого борта корабля увеличился настолько же, насколько уменьшился слева от осевой линии. Правая часть корабля вытесняет больше воды, чем левая, значит, и центр тяжести вытесненного объема жидкости тоже переместился вправо от осевой линии. Оказывается, центр давления «путешествует»! Только это и создает устойчивость. На рисунке видно, что вес и выталкивающая сила образуют пару сил, которая стремится вернуть корабль в положение устойчивого равновесия. Игла, точка опоры которой ниже центра тяжести, не может стоять на зеркале вертикально.

## МЕТАЦЕНТР

Мы установили, что при крене корабля центр давления смещается от осевой линии в ту же сторону. При этом обычно возникает пара сил, которая стремится вернуть корабль в положение равновесия. Удастся или не удастся этим силам выровнять корабль, зависит от многих причин: от формы корабля, от того, как он нагружен и какой крен он сделал. Если трюм корабля правильно нагружен и борта его достаточно высоки, то даже большой крен кораблю не страшен. Когда же основная масса груза расположена на палубе, а трюм почти пустой, даже небольшой крен может стать причиной гибели судна.

Точка $M$, в которой выталкивающая сила пересекается с осью корабля, называется **метацентром.** Если метацентр расположен выше центра тяжести судна — корабль устойчив, если ниже—неустойчив. На рисунке 10 слева изображен крен судна с правильно нагруженным трюмом. Центр тяжести корабля находится сравнительно близко от киля и расположен

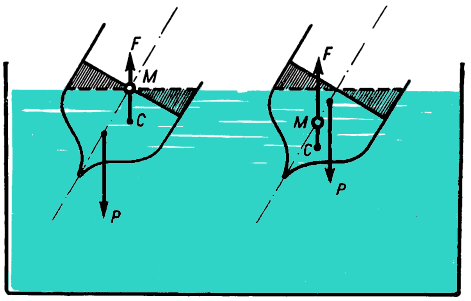
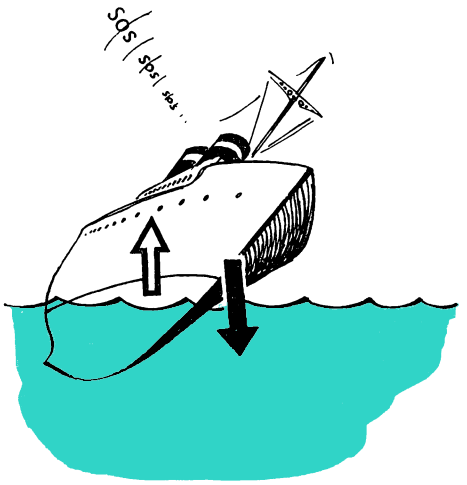



**Рис. 10.**

ниже метацентра. Справа на том же рисунке — крен судна с перегруженной палубой и пустым трюмом. Центр тяжести судна находится сравнительно ближе к палубе и расположен выше метацентра. В этом случае сила тяжести и выталкивающая сила опрокидывают корабль. Чем выше метацентр над центром тяжести, тем большей остойчивостью обладает судно.




В наше время только сошедший с ума капитан может загрузить свое судно так, что центр тяжести окажется выше метацентра. Тяжелые грузы помещают в нижнюю часть трюма, а легкие — в верхнюю и на палубу.

Трюмы грузовых судов, идущих порожняком, иногда специально загружают балластом, чтобы метацентр был выше центра тяжести.

## ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ

Когда речной буксир тянет баржу, видно и на глаз, что он намного больше ее. Но моряки определяют размеры судна точной цифрой: не длиной и шириной, а водоизмещением. Если водоизмещение судна 5 тыс. $m$, это значит, что столько весит вытесненная им вода, когда оно нагружено до нормы. Вес корабля с грузом также равен в этом случае 5 тыс. $m$—ведь когда тело плавает, его вес равен весу вытесненной жидкости. На обшивке судна обычно делают отметку, соответствующую его погружению при полной нагрузке. Но если корабль перейдет из одного океана в другой, где вода более соленая, уровень его погружения станет меньше. Водоизмещение, равное весу судна, при этом, понятно, не изменится, но глубина погружения станет меньше. На обшивке судна поэтому делают не одну, а несколько отметок в зависимости от солености воды в различных морях.

Чем больше водоизмещение корабля, тем больше груза он может взять на борт. Водоизмещение в современном судостроении непрерывно увеличивается: у советского танкера «София» водоизмещение 62 500 $m$, в Японии строится танкер «Ниссо мару» водоизмещением в 132 000 $m$! Это примерно в три раза больше, чем водоизмещение каждого из таких гигантов Атлантики, как «Иль-де-Франс» (45 000 $m$), «Нормандия» (46 000 $m$), и почти в два раза больше водоизмещения «Куин Мери» (81 000 $m$).

## КОРАБЕЛЬНЫЙ АКАДЕМИК КРЫЛОВ

Английский линейный корабль «Роял Джордж», стоявший в 1799 г. на рейде Саутгемптона, немного наклонили, чтобы очистить днище от ракушек и водорослей. Для этого пушки с одного борта откатили к осевой плоскости судна, пушки же другого борта оставили на своем месте. Судно получило безопасный для него крен. Огневые люки нижнего ряда пушек были выше поверхности моря. До вечера работу не успели закончить, а ночью на море поднялось небольшое волнение. Волны захлестнулись в пушечные люки, вода просочилась в трюм, и корабль перевернулся. Погибло около 1000 человек, вместе с ними и адмирал, командовавший эскадрой.

Способность корабля оставаться на плаву при большем или меньшем крене называется запасом плавучести. Знаменитый кораблестроитель акад. А. Н. Крылов много лет работал над теорией остойчивости и непотопляемости корабля. Он часто приводил в пример эту катастрофу для подтверждения той мысли, что запас плавучести судна измеряется объемом его надводной части. Действительно, пусть даже борта корабля высоко подняты над поверхностью моря, но, если в них есть какие-либо незадраенные, т. е. не закрытые плотно, отверстия, запас плавучести резко снижается.

А. Н. Крылов отмечал, что иногда даже нужно искусственно уменьшать запас плавучести. В наше время каждый большой корабль разделен на водонепроницаемые отсеки. Попав в поврежденный отсек, вода может придать кораблю опасный крен. Пожертвовав некоторым запасом плавучести и затопив подводные отсеки другого борта, можно сохранить поврежденный корабль на плаву. Еще в 1904 г. А. Н. Крылов разработал для некоторых типов военных кораблей таблицы непотопляемости. Но царское адмиралтейство не осуществило предложение ученого.

Инженер броненосца «Орел» В. П. Костенко, знакомый с таблицами Крылова, по своей инициативе устроил на корабле систему выравнивания. И во время Цусимского боя, несмотря на тяжелые повреждения, этот корабль оставался на плаву. А получившие такие же повреждения броненосцы «Александр III», «Бородино», «Суворов» опрокинулись и затонули.

## АТОМНЫЙ ЛЕДОКОЛ «ЛЕНИН»

В нашей стране за годы Советской власти создан сильный Военно-Морской Флот, в строительстве которого активное участие принимал А. Н. Крылов. Наши торговые суда бороздят все океаны мира, а на севере СССР работает самый мощный в мире ледокольный флот.

В 1959 г. в СССР вступил в строй первый атомный ледокол «Ленин», ставший флагманом Полярного флота. Это один из самых замечательных кораблей нашего времени (см. в т. 5 статьи «Водный транспорт», «Атом на службе человека»).

У ледокола «Ленин» большое водоизмещение — 16 тыс. *т*. Энергетическое сердце корабля — три мощных атомных реактора. Их суточная потребность в топливе — несколько десятков... граммов ядерного горючего. Без остановок ледокол может продвигаться во льдах двухметровой толщины. Атомный ледокол продлил навигацию по Северному морскому пути почти в два раза.

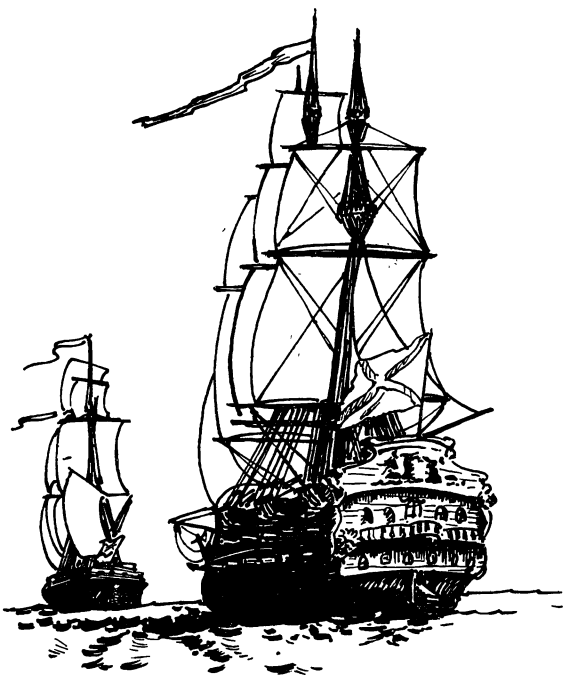
В конструкции атомохода была использована и разработанная акад. А. Н. Крыловым теория непотопляемости. Одиннадцать водонепроницаемых переборок сохранят корабль на плаву даже в том случае, если будут затоплены два главных отсека.

На самом ли деле ледокол колет лед? Нет, это представление неверно. Корпусу ледокола придана такая форма, что нос его с разгона въезжает на лед, ломает и продавливает его.

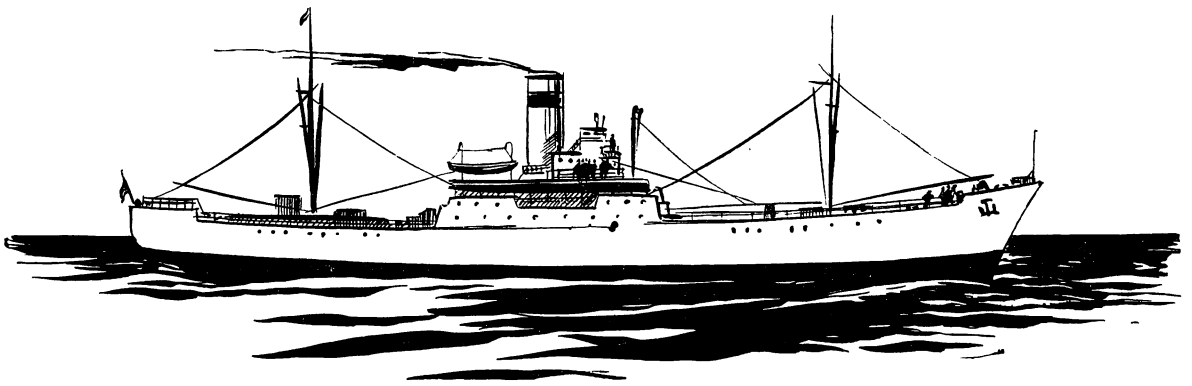
## КАК ДВИЖЕТСЯ КОРАБЛЬ?

Примерно 160 лет назад Роберт Фультон впервые предложил установить на корабле паровую машину. «Когда я строил в Нью-Йорке свой первый пароход,— вспоминал он впоследствии,—люди отнеслись к моему замыслу презрительно, как к фантастической затее».

Еще совсем недавно основным типом кораблей были пароходы, сжигающие в топках своих паровых котлов каменный уголь. Паровая машина приводила в действие колеса или винт. Первым пароходам не хватало взятого на борт угля, чтобы пересечь Атлантику.



Парусные корабли из эскадры адмирала Ушакова.



Корабль с паровым двигателем.

На большинстве современных кораблей установлены дизельные двигатели, вырабатывающие электроэнергию. Вал винта приводится в действие электромотором. На ледоколе «Ленин» и американском грузо-пассажирском судне «Саванна» установлены атомные двигатели, позволяющие им совершать дальние плавания без пополнения запасов топлива — 1 *кг* урана им хватает на целый месяц плавания. Американские подводные лодки совершали кругосветные плавания, не пополняя запасы топлива.

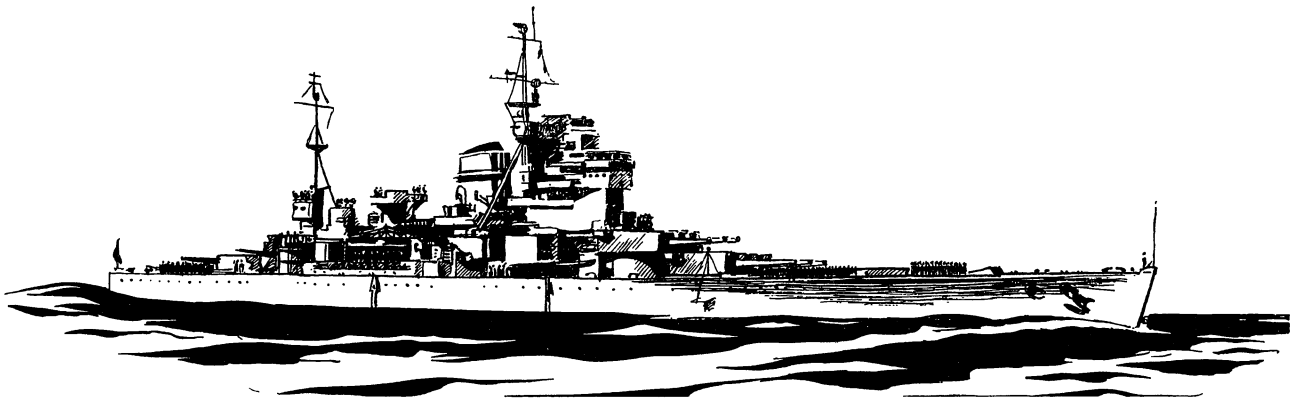
Ходовой винт корабля, вращаясь в воде, создает усилие тяги. Корабль медленно набирает скорость. При движении с постоянной скоростью корабль рассекает воду и испытывает ее сопротивление. Сила этого сопротивления зависит от скорости корабля, от формы и величины его корпуса. Чем у́же корабль, чем плавнее его «обводы», тем большую скорость он развивает при той же мощности двигателей. Поэтому у скоростных кораблей вытянутая стреловидная форма.

Вся мощность двигателя при движении корабля расходуется, чтобы преодолеть сопротивление воды. Но чтобы увеличить скорость корабля в 2 раза, мощность двигателей и запасы топлива должны быть увеличены уже в 4 раза. Скорости современных пассажирских и военных судов достигают 40 узлов (узел — 1,852 *км/час*). При дальнейшем увеличении скорости двигатель и запас топлива заняли бы все водоизмещение судна, не оставив места для пассажиров и полезного груза.

Древние мореплаватели использовали для движения кораблей энергию ветра. На парусниках водоизмещением едва в 500 *т* Колумб достиг Америки, а Магеллан обогнул земной шар.

Еще 100 лет назад, в Крымской войне, участвовали парусные стопушечные корабли водоизмещением в несколько тысяч тонн!

Но парусник всегда зависел от капризов погоды. В наше время парусные суда исполь-



Военный корабль с дизельными двигателями.

зуются в основном для спорта, подготовки моряков, рыбного промысла и для научных экспедиций. Советское парусное судно «Заря» оснащено специальной аппаратурой для измерения магнитного поля Земли. Чтобы не мешать показаниям этих приборов, на судне нет ни одной железной детали.

Парусное судно может двигаться даже против ветра, используя его силу. Это кажется удивительным: судно перемещается по ломаной линии. Такой способ движения называется лавировкой. Если при таком движении ветер дует справа, то говорят, что судно идет правым галсом; если слева — то левым галсом. Чтобы парусник мог лавировать, у него должен быть большой и тяжелый киль. Тяжесть повышает остойчивость при боковом ветре; большая площадь киля создает большое сопротивление при боковом смещении судна; сопротивление движению вперед у него в сотни раз меньше, чем в боковом направлении.

Рассмотрим лавировку на примере яхты (рис. 11). Сила ветра $OA$ создает силу $OB$, действующую на парус $PP_1$. Силу $OC$ учитывать не нужно, так как ветер совсем не действует на парус, когда он дует вдоль его плоскости.

Разложим теперь силу $OB$ на две силы: одну—$OK$, движущую судно по направлению киля $LL_1$; другую — $OM$, перендикулярную к направлению киля; силу $OM$ можно не принимать во внимание, так как вода оказывает очень большое сопротивление такому перемещению лодки. Таким образом, очень большая сила $OA$ теряет свою бо́льшую составляющую $OC$, другая его часть — $OM$ давит на киль, но киль не смещается из-за большого сопротивления воды. И только небольшая часть силы $OA$—в направлении $OK$ — двигает яхту хоть и наискосок, но все же навстречу ветру. Пройдя немного так, левым галсом, яхтсмен изменит положение паруса, и яхта пойдет правым галсом.

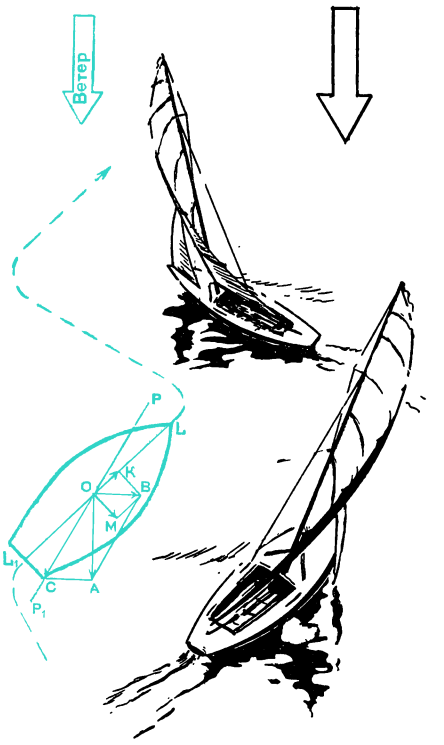



**Рис. 11. Лавирование парусного судна.**

## ЗВУК

Кажется, совсем не нужно пояснять, что такое звук. Это то, что мы слышим. Это и нежная мелодия скрипки, и тревожный звон колокола, и грохот грома или водопада, и слова, произносимые человеком... Все это звуки, и потому мы их слышим. Но само физическое явление—звук—существует на Земле помимо человека. В те далекие времена, когда на Земле не было не только людей, но и простейших живых организмов, гремели грозовые раскаты грома, грохотали водопады, земную кору потрясали невиданные землетрясения. Но эти звуки никто не слышал, потому что некому было их слышать. Природа щедра, но ничего она не делает даром, без нужды. И если почти всем животным на Земле природа подарила способность воспринимать звуки, значит, им это было необходимо, без этого они не могли бы выжить в борьбе за существование.

С точки зрения физики звук — это возникновение и распространение колебаний в каком-либо веществе, будь то воздух, жидкость или твердое тело. Если бы на Луне были живые существа, слух им не понадобился бы: на Луне нет атмосферы, и в безвоздушном пространстве нечему колебаться, там нет и звука.

Наука доказала, что рыбы вовсе не немы и не глухи, они тоже издают звуки и слышат их, потому что они воспринимают колебания, возникающие в воде. Людям же удается «услышать» их только с помощью специальных приборов.

В твердых телах тоже возникают и распространяются колебания. Землетрясение ощущается не только в том месте, где оно возникло, но за десятки, сотни и даже тысячи километров.

Наш орган слуха — ухо — устроен так, что непосредственно слышит звуки, распространяющиеся не только в воздухе, но и в воде. Если вы приставите к своей голове камертон, звучащий так слабо, что ухо не улавливает его звук, то явственно услышите этот звук через кость: органы внутреннего уха уловят колебания, распространяющиеся в твердом теле.

Излучают звук колеблющиеся тела: струна, камертон (если по ним ударить), колебания воздуха в прорези свистка, колебания голосовых связок и т. п.

Воздух — это смесь газов. Молекулы газов, составляющие воздух, находятся в беспорядочном тепловом движении, беспрерывно сталкиваются друг с другом и разлетаются. За 1 секунду каждая молекула сталкивается с другими миллиарды раз. Скорость их движения достигает 1000 *м/сек*. Атмосфера существует на Земле только благодаря притяжению планеты; если бы оно исчезло, все молекулы воздуха немедленно улетели бы в межзвездное пространство. Притяжение Земли создает и атмосферное давление. Но молекулы воздуха не падают на Землю, подобно камню, так как они обладают кинетической энергией, беспрерывно обмениваются ею друг с другом, противодействуют сжимающему их давлению. Это значит, что газ обладает упругостью: он сопротивляется сжатию, а когда давление снято, расширяется, занимая весь предоставленный ему объем. Упругостью обладают и жидкости и твердые тела.

В твердых телах и в жидкостях действуют большие силы межмолекулярного притяжения. Их молекулы не могут разойтись на расстояние большее, чем позволяют эти силы. В газах же такие силы очень слабы и их молекулы сближает только внешнее давление.

Упругость воздуха выражается в том, что любое давление на воздух передается им равномерно во все стороны. Поэтому и возможна в воздухе передача упругих волн, т. е. сжатий и разрежений газа, созданных любым посторонним телом.

Из всего многообразия **упругих волн** звуковыми называют лишь те из них, которые способен воспринимать наш орган слуха. Возникновение, распространение и свойства звуковых волн изучаются специальным разделом физики — акустикой.

## ЗВУКОВАЯ ВОЛНА

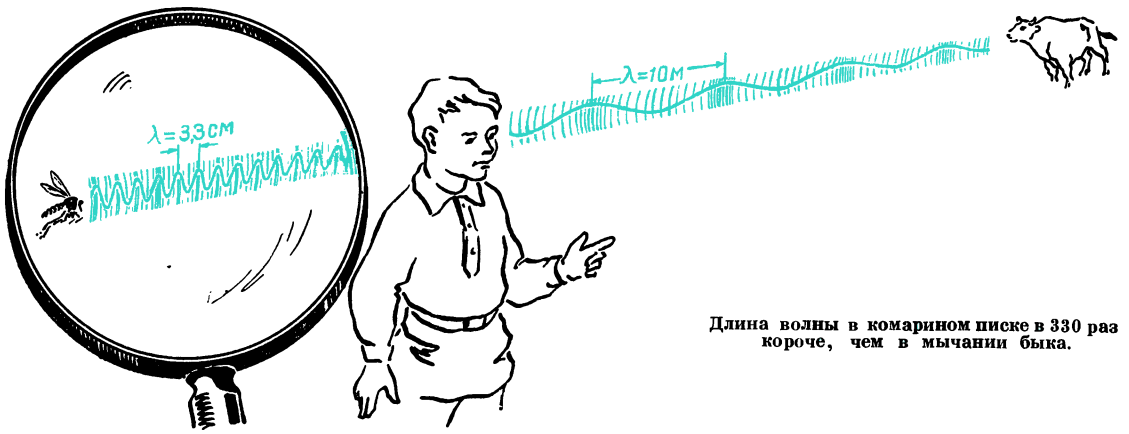
При вибрации звучащее тело отклоняется от своего положения равновесия попеременно в противоположные стороны. При каждом отклонении оно сжимает одной своей стороной прилегающий к нему воздух, а другой стороной разрежает. С одной его стороны давление воздуха становится чуть больше атмосферного, и настолько же оно уменьшается на противоположной стороне. Разница между давлением в слое сжатия или разрежения и обычным атмосферным давлением называется **акустическим** или **звуковым давлением**.

Чередующиеся сжатия и разрежения, созданные вибрирующим телом — **источником**,— передаются в воздухе благодаря его упругости от слоя к слою, т. е. распространяются от места их возникновения во все стороны. Созданные вибрирующим телом сжатия и разрежения воздуха повторяются, постепенно затухая, в каждой точке пространства, куда достигнет волна.

Физики-акустики умеют измерять свойства звуковой волны. Наибольшее значение в этих измерениях имеет определение величины акустического давления и его **частоты**, т. е. количества колебаний в одну секунду. Единица этого измерения– **герц** — названа по имени немецкого ученого Генриха Герца. Герц — частота, при которой в одну секунду происходит одно колебание. Обозначается она *гц*.

Орган слуха у человека воспринимает упругие волны с частотами от 16 колебаний в секунду до 20 000, т. е. с частотами от 16 до 20 000 *гц* (20 *кгц*) Волны с частотами меньше 16 *гц* называют инфразвуком, с частотами больше 20 *кгц* — ультразвуком.

Чтобы иметь более полное представление о звуковой волне, нужно, кроме частоты, знать и ее **длину** — расстояние между ближайшими слоями сжатия (или разрежения) — и **скорость** ее распространения. Все эти величины: частота $\nu$, длина $\lambda$ и скорость $v$ — взаимозависимы. Если измерить две из них, можно найти и тре-




Длина волны в комарином писке в 330 раз короче, чем в мычании быка.

тью. Их зависимость друг от друга можно выразить в простой формуле:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}.$$

Так как **период колебаний**, т. е. время, за которое проходит одно колебание, определяется через частоту $T = \frac{1}{\nu}$, то связь этих величин выражается формулой.:

$$\lambda = vT.$$

Когда над вашим ухом зудит комар, вы слышите звуки очень высокого тона. Их частота превышает 10 000 колебаний в секунду, длина же звуковой волны равна приблизительно 3,3 *см*.

В мычании быка нет звуков с частотой, большей 30 *гц*. Наименьшая длина волны такого звука равна примерно 10 *м*. Остальные звуковые волны в мычании быка длиннее 10 *м*.

## КАК ИЗМЕРИЛИ СКОРОСТЬ ЗВУКА

Мысль измерить скорость звука впервые пришла английскому философу Фрэнсису Бэкону. По его совету этим занялся французский ученый Марен Марсенн. В 1630 г. он провел наблюдение над выстрелом из мушкета. Расстояние между наблюдателем и мушкетом было поделено на время, прошедшее между вспышкой от выстрела и долетевшим до наблюдателя звуком. Марсенн нашел, что скорость звука равна 230 туазам в секунду, что соответствует 448 *м/сек*.

Спустя полвека английский ученый Исаак Ньютон вычислил скорость звука теоретически, исходя из упругих свойств воздуха и зависимости объема газа от давления, зависимости, выраженной законом Бойля—Мариотта. Эта скорость оказалась немногим более половины скорости, полученной в опыте Марсенна. Когда теория противоречит опыту, следует искать, где же ошибка. Ее начали искать и в теоретических рассуждениях Ньютона, и в опыте Марсенна.

В 1738 г. французская Академия наук повторила измерение скорости звука. Опыт был поставлен на холме Монмартр, близ Парижа. Было установлено, что скорость звука равна 171 туазу в секунду, что соответствует 337 *м/сек*. Несовпадение с опытом Марсенна объяснили тем, что его измерение времени было несовершенным. Однако и результат повторного опыта не соответствовал теоретической формуле Ньютона.

В 1808 г. французский ученый Пуассон выяснил, что закономерность, обнаруженная Бойлем и Мариоттом (именно она была положена в основу расчетов Ньютона), неприменима для описания, как распространяется звук в воздухе. Этот закон справедлив лишь в том случае, когда объем газа изменяется медленно—так, что сжимаемый газ отдает среде, которая его окружает, возникающее в нем тепло; или, наоборот, так, что медленно расширяющийся газ успевает нагреваться от окружающей среды. Следовательно, постоянство температуры воздуха (основное условие закона Бойля—Мариотта) может быть сохранено лишь в **изотермических** условиях, т. е. при свободном теплообмене между сжимаемым газом и окружающей этот газ средой.

Именно этих условий и нет в звуковой волне. Теплопроводность воздуха мала, а расстояние

между слоями сжатия и разрежения велико. Избыток тепла из слоя сжатия не успевает перейти в слой разрежения. Давление и объем изменяются в соседних слоях без теплообмена и, следовательно, при изменяющейся температуре. Физические процессы, происходящие без теплообмена с окружающей средой, называются **адиабатическими**. В адиабатическом процессе сжимаемый газ нагревается (вспомните, как нагревается велосипедный насос, если очень быстро накачивать шину), а расширяющийся — охлаждается.

Различие между расширениями газа в изотермических и адиабатических условиях позволило французскому ученому Лапласу объяснить, почему скорость звука, вычисленная по формуле Ньютона, не совпадает с результатом опыта: колебания звукового давления в воздухе происходят в адиабатических, а не в изотермических условиях.

В 1822 г. близ Парижа вновь были поставлены опыты. В них участвовали ученые: Гей-Люссак, Араго, Гумбольдт и др. Результаты опыта совпали с теоретическими вычислениями Лапласа и подтвердили, что скорость звука возрастает с повышением температуры. В сухом воздухе при 0°Ц она равна 331,5 *м/сек*, а при 20°Ц — 344 *м/сек*.

При одной и той же температуре скорость звука больше в том газе, у которого меньше молекулярный вес. При 0°Ц скорость звука:

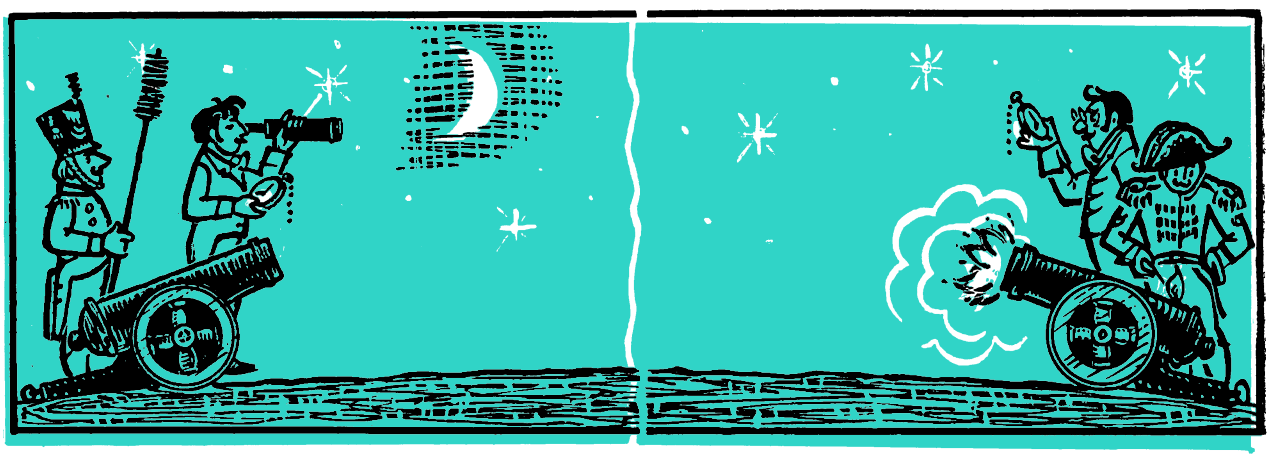
| | | |
|---|---|---|
| в водороде | — 1284 | *м/сек*, |
| в гелии | — 965 | *м/сек*, |
| в азоте | — 334 | *м/сек*, |
| в кислороде | — 316 | *м/сек*. |

В воде, упругость которой больше, чем у воздуха, звук распространяется при 20°Ц со скоростью 1484 *м/сек*. Упругость твердых тел больше, чем жидкости. В алюминии, железе, стали скорость звука равна примерно 5000 *м/сек*.

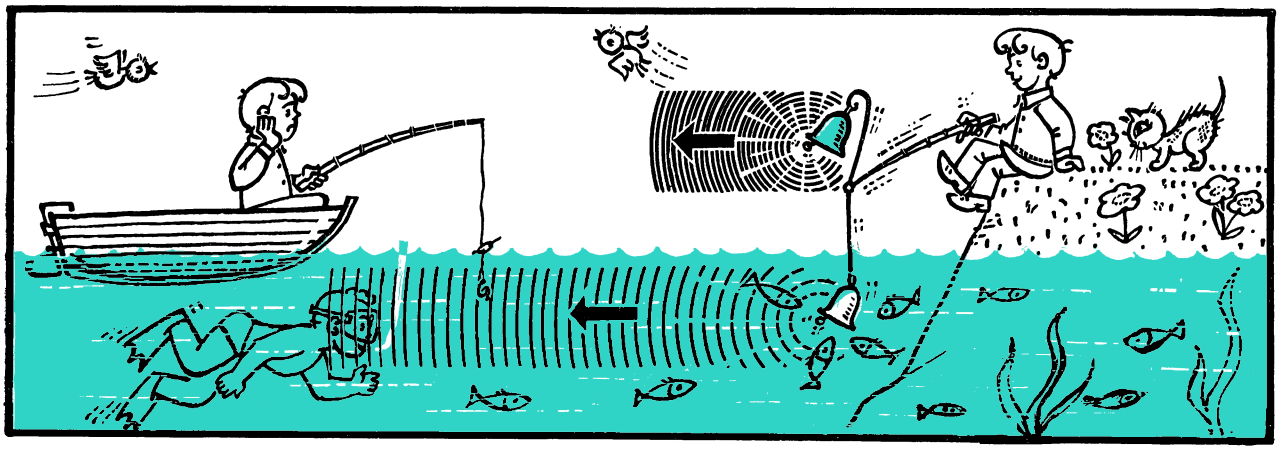
## РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА

Звук распространяется от звучащего тела равномерно во все стороны, если на его пути нет никаких препятствий. Но не всякое препятствие может ограничить его распространение. От звука нельзя загородиться небольшим листом картона, как от пучка света. Звуковые волны, как и всякие волны, способны огибать препятствия, «не замечать» их, если их размеры меньше, чем длина волны. Длина слышимых в воздухе звуковых волн колеблется от 15 *м* до 0,015 *м*. Если у препятствий на их пути меньшие размеры (например, у древесных стволов в редколесье), то волны их просто огибают. Препятствие же бóльших размеров (стена дома, скала) отражает звуковые волны по тому же закону, что и световые: угол падения равен углу отражения. Эхо — это отражение звука от препятствий.

Своеобразно переходит звук из одной среды в другую. Явление это довольно сложное, но оно подчиняется общему правилу: звук не переходит из одной среды в другую, если их плотности резко отличны, например из воды в воздух. Достигая границы этих сред, он почти полностью отражается. Очень незначительная часть его энергии уходит на вибрацию



**Так была впервые измерена скорость звука.**



**Оба колокольчика излучают звуковые волны с одинаковой частотой. Длина волны больше в той среде, где она распространяется с большей скоростью.**

поверхностных слоев другой среды. Погрузив голову под самую поверхность реки, вы еще услышите громкие звуки, на глубине же в 1 *м* уже ничего не услышите. Рыбы не слышат звук, раздающийся над поверхностью моря, но звук от тела, вибрирующего в воде, они слышат хорошо.

Через тонкие стенки звук слышен потому, что он заставляет их колебаться, и они как бы воспроизводят звук уже в другой комнате. Хорошие звукоизоляционные материалы — вата, ворсистые ковры, стены из пенобетона или пористой сухой штукатурки — как раз тем и отличаются, что в них очень много поверхностей раздела между воздухом и твердым телом. Проходя через каждую из таких поверхностей, звук многократно отражается. Но, кроме того, и сама среда, в которой звук распространяется, поглощает его. Один и тот же звук слышен лучше и дальше в чистом воздухе, чем в тумане, где его поглощают поверхности раздела между воздухом и капельками воды.

По-разному поглощаются в воздухе звуковые волны различной частоты. Сильнее — звуки высокие, меньше — низкие, такие, например, как бас. Именно поэтому пароходный гудок издает такой низкий звук (частота его не более 50 *гц*): низкий звук слышен на большем расстоянии. Большой колокол в Московском Кремле, когда он еще висел на колокольне «Иван Великий», был слышен за 30 верст — он гудел тоном примерно в 30 *гц* (*фа* субоктавы). Еще меньше поглощаются инфразвуки, особенно в воде. Рыбы слышат их за десятки и сотни километров. А вот ультразвук поглощается очень быстро: ультразвук с частотой в 1 *Мгц* ослабляется в воздухе вдвое на расстоянии 2 *см*, тогда как звук в 10 *кгц* ослабляется вдвое на 2200 *м*.

## ЭНЕРГИЯ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ И СИЛА ЗВУКА

Хаотическое движение частиц вещества (в том числе и молекул воздуха) называют **тепловым**. Когда в воздухе распространяется звуковая волна, его частицы приобретают, кроме теплового, еще и дополнительное движение — **колебательное**. Энергию для такого движения дает частицам воздуха вибрирующее тело (источник звука); пока оно колеблется, энергия беспрерывно передается от него в окружающий воздух. Чем дальше пройдет звуковая волна, тем слабее она становится, тем меньше в ней энергии. То же самое происходит со звуковой волной и в любой другой упругой среде — в жидкости, в металле.

Звук распространяется равномерно во все стороны, и в каждый момент слои сжатого воздуха, возникшие от одного импульса, образуют как бы поверхность шара, в центре которого находится звучащее тело. Радиус и поверхность такого «шара» беспрерывно растут. Одно и то же количество энергии приходится на все большую и большую поверхность «шара». Поверхность шара пропорциональна квадрату радиуса, поэтому количество энергии звуковой волны, проходящей, допустим, через квадратный метр поверхности, обратно пропорционально квад-

рату расстояния от звучащего тела. Следовательно, на расстоянии звук становится слабее.

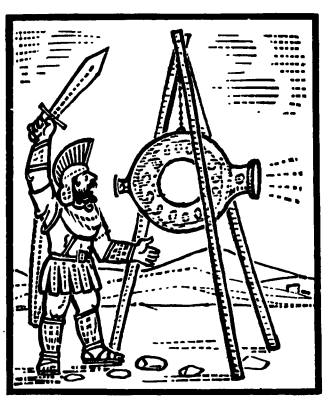
Русский ученый Н. А. Умов ввел в науку понятие **поток плотности энергии.** Величиной потока энергии удобно измерять и силу (**интенсивность**) звука. Поток плотности энергии в звуковой волне — это количество энергии, которое проходит за секунду через единицу поверхности, перпендикулярной направлению волны. Чем больше поток плотности энергии, тем больше сила звука. Измеряется поток энергии в ваттах на квадратный метр ($вт/м^2$).

## ЭНЕРГИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ГОЛОСА

Голосовой аппарат человека, как и любой источник звука, передает энергию в окружающую среду, но эта энергия очень мала. Представьте себе, что вы на стадионе, где одновременно говорят и кричат 100 000 человек. Если превратить поток энергии этих голосов в энергию электрическую, то ее едва хватит на лампочку маленького электрического фонарика. Мощность одновременного разговора всех людей на земном шаре едва ли больше мощности автомобиля «Москвич».

Уже давно придуманы устройства, позволяющие слышать голос на далеком расстоянии. Благодаря свойству отражаться от препятствий звуковые волны можно специальными устройствами направлять в определенную сторону, подобно лучу прожектора.

Желая окликнуть кого-либо, находящегося в отдалении, мы обычно подносим ко рту ладони и тем самым направляем поток звуковой энергии в нужную нам сторону. По этому же принципу устроен **рупор.** Он создает направленную звуковую волну так, что поток ее энергии не рассеивается во все стороны, а концентрируется в одном направлении.

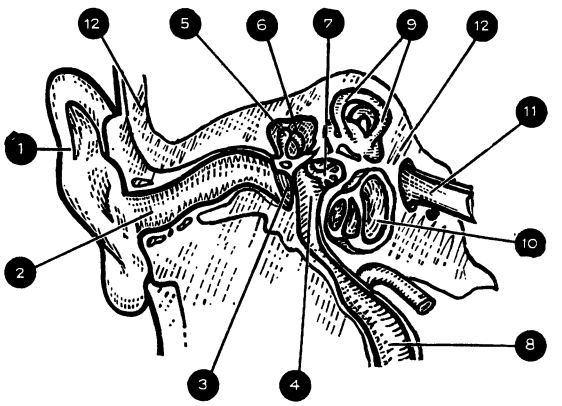


Рупор полководца.

Греческий полководец Александр Македонский пользовался во время сражений рупором. В грохоте боя трудно было бы слышать слова команды, но, если отдавать ее через рупор, она хорошо слышна и на большом расстоянии.

## НАШЕ УХО

В органе слуха различают наружное, среднее и внутреннее ухо. **Наружное ухо** — это ушная раковина и начало слухового прохода до барабанной перепонки. За ней — область **среднего уха:** полость, заполненная воздухом, и три слуховые косточки. Первая из них, **молоточек,** одним концом сочленена с **барабанной перепонкой,** другим — со второй косточкой — **наковальней.** Наковальня соединена с третьей косточкой — **стременем,** которое упирается в перепонку, отделяющую среднее ухо от внутреннего. Молоточек, наковальня и стремя — это своеобразный рычажный механизм, передающий колебания барабанной перепонки во внутреннее ухо. Внутреннее ухо (**лабиринт**) — это полость, свернутая улиткой и наполненная жидкостью. Внутри лабиринта есть мембрана, соприкасающаяся со **слуховыми нервами.**




**Органы слухового аппарата у человека:** *1* **— ушная раковина;** *2* **— наружный слуховой проход;** *3* **— барабанная перепонка;** *4* **— барабанная полость;** *5* **— молоточек;** *6* **— наковальня;** *7* **— стремя;** *8* **— евстахиева труба;** *9* **— полукружные каналы;** *10* **— улитка;** *11* **— слуховой нерв;** *12* **— височная кость.**

При тишине давление воздуха с обеих сторон барабанной перепонки одинаково и она находится в состоянии покоя. Когда же в наружном ухе давление воздуха увеличивается, барабанная перепонка прогибается внутрь. При этом воздух, находящийся в среднем ухе, сжимается. Если давление воздуха в наружном ухе уменьшается, упругий воздух в среднем ухе прогибает барабанную перепонку в область наружного уха.

Любое периодическое изменение акустического давления в пределах от 16 *гц* до 20 *кгц* приводит к периодическим колебаниям барабанной перепонки. Ее колебания передаются

молоточку, наковальне и стремени. Стремя передает колебания перепонке, отделяющей внутреннее ухо от среднего. В жидкости лабиринта возникают упругие волны, и они приводят в движение мембрану улитки. Мембрана соприкасается с кончиками нервных корешков, которые передают раздражение в мозг. Эти раздражения и воспринимаются мозгом как звук.

## ЗАГАДКА НАШЕГО СЛУХА

Движение в виде волн встречается почти во всех областях физических явлений. Звуковые волны, как и волны в любых других физических явлениях, оказывают переменное во времени давление на предмет, стоящий на их пути.

Благодаря звуковому давлению мы и можем слышать звук. Оно ничтожно. Мы легко улавливаем чуть слышный шорох, хотя его звуковое давление на барабанную перепонку уха равно всего лишь $3 \cdot 10^{-5}$ *н/м*$^2$, т. е. в $3 \cdot 10^{10}$ раз меньше давления атмосферного. Такое давление соответствует нагрузке примерно трем десятимиллионным грамма на 1 *см*$^2$. Наше ухо гораздо чувствительнее, чем самые точнейшие химические весы!

Такая чувствительность уха уже сама по себе загадочна. Физиологи рассчитали, исходя из физической упругости барабанной перепонки, на какую величину она смещается под давлением самого слабого звука, который можно еще отчетливо услышать. И получилась трудно понимаемая величина: такой слабый звук прогибает барабанную перепонку на расстояние меньше, чем... размеры атома! Науке еще не вполне ясно, как осуществляется в нашем ухе передача и восприятие столь слабых звуков.

## ЕЩЕ БОЛЕЕ УДИВИТЕЛЬНАЯ ЗАГАДКА

Мать, спящая возле больного ребенка, сразу же просыпается в тревоге, если его дыхание изменится. Она чутко слышит и из всех других шумов выделяет изменения в чуть слышных звуках детского дыхания. И то же самое ухо переносит без особого для себя вреда чудовищные раскаты грома, когда человек попадает в центр сильной грозы.

Поток энергии самого слабого звука, который воспринимают люди, обладающие особой остротой слуха, поразительно ничтожен: можно услышать звук с энергией, равной $10^{-12}$ *вт/м*$^2$. А перестает слышать наше ухо только те звуки, поток энергии которых превышает 10 *вт/м*$^2$. Звук такой интенсивности непереносим — он вызывает ощущение нестерпимой боли.

Способность воспринимать звуки, интенсивность которых различается в $10^{13}$ раз, — это уже совершенно замечательное и удивительное свойство нашего уха! Измерительная техника не знает такого прибора, которым можно было бы определять величины, различающиеся в десять триллионов раз (10 000 000 000 000). На весах с таким диапазоном чувствительности можно было бы взвесить и камень в один килограмм и небольшую планету.

## СЛУХ И ЛОГАРИФМЫ

Только привычка пользоваться своим слухом да недостаточная осведомленность мешают нам удивляться подлинному чуду — устройству нашего уха.

Наше ухо — очень точный прибор. Мы легко определяем, сравнивая два звука, какой из них громче и какой обладает большей энергией, даже если их интенсивности близки. А слышать мы можем и шелест листьев, и тиканье часов, и раскаты грома, и грохот водопада. Каждый из этих звуков воспринимается органом слуха, который оценивает его громкость.

Зависимость между энергией воспринимаемого звука и тем ощущением громкости, которое он производит, установлена опытным путем. При этом выяснилось, что изменение громкости звука при изменении потока энергии звуковой волны проще всего оценивать с помощью логарифмов.

Принято считать, что громкость звука изменится на единицу, если его энергия увеличится или уменьшится в 10 раз. Единица громкости — *бел* (*б*). Однако для практических оценок громкости звука оказалось удобнее пользоваться десятой частью этой единицы — *децибелом* (*дб*).

Если энергия первоначального звука $E_0$ возрастет в 10 раз, т. е. окажется равной 10 $E_0$, то громкость воспринимаемого звука увеличится на 10 *дб*; энергия вырастет в 100 раз, громкость повысится на 20 *дб*; в 1000 раз — на 30 *дб*. Всему необъятному диапазону в изменениях энергии звука, который доступен нашему уху, т. е. изменение примерно в 10 триллионов раз, соответствует изменение в ощущении громкости всего на 13 *б*, или на 130 *дб*.

Физики условились принять за начальный уровень отсчета энергию такого слабого звука, который может услышать далеко не каждый человек даже с очень чутким слухом. Энергия такого звука равна $E_0=10^{-12}$ *вт/м²*. С помощью этой величины определяется громкость любого звука. Если его энергия равна $E$, то его громкость, выраженная в децибелах, будет $10 \lg \frac{E}{E_0}$ *дб*. Даем табличку, в которой показана громкость знакомых всем звуков на расстоянии нескольких метров и соответствующая им энергия потока:

| | | |
|---|---|---|
| шелест листьев | — 10 *дб* | — $10^{-11}$ *вт/м²*, |
| тиканье часов | — 20 *дб* | — $10^{-10}$ *вт/м²*, |
| мирная беседа | — 40 *дб* | — $10^{-8}$ *вт/м²*, |
| громкий разговор | — 70 *дб* | — $10^{-5}$ *вт/м²*, |
| шумная улица | — 90 *дб* | — $10^{-3}$ *вт/м²*, |
| самолет на старте | — 100 *дб* | — $10^{-2}$ *вт/м²*. |

Эта таблица полезна. Пусть она напоминает, что громкий разговор действует на наши уши с энергией в 1000 раз большей, чем мирная беседа. Берегите свои уши и нервы.

## ГРОМКОСТЬ ЗВУКА И ЕГО ТОН

Один и тот же звук может восприниматься одним человеком как нормальный, а другим — как громкий. Громкость звука зависит не только от чувствительности уха, но и от психического восприятия. И тем не менее каждый человек воспринимает звук, обладающий большей энергией, как более громкий.

Самый слабый звук с самой малой энергией, воспринимаемый ухом, называют порогом слышимости. Низкие и высокие тона воспринимаются на пороге слышимости поразному. Чтобы у них была одинаковая громкость, энергия и давление звука должны быть у низких тонов больше, чем у высоких. Тембр звука определяется не только количеством высоких и низких обертонов, но и соотношением их энергий и звуковых давлений.

Очень сильные звуки создают в органах слуха ощущение боли. Звук любого тона имеет **болевой порог восприятия**. На цветном рисунке у страницы 112 показаны границы слышимости. Область слышимости ограничена двумя кривыми: порога слышимости и порога болевого восприятия. Естественная же область звуковых давлений, воспринимаемых ухом при звучании голоса, показана на этом рисунке штриховкой.

## ОТКУДА ПРИШЕЛ ЗВУК?

Вас кто-то окликнул. Услышав голос, вы повернете лицо именно в ту сторону, откуда он донесся. Происходит это потому, что слуховые раздражения приходят в мозг одновременно от обоих ушей только в том случае, если источник звука находится от них на равном расстоянии. Голову мы поворачиваем всегда в ту сторону, откуда звуковое раздражение пришло в мозг хотя бы на сотую долю секунды раньше, чем раздражение, воспринятое другим ухом.

Таким образом, восприятие звука обоими ушами дает возможность определить, в какой стороне от нашего лица находится источник звука. Это свойство нашего слуха называется **бинауральным эффектом**. Его часто используют в технике, например для стереофонического звучания в кино. При демонстрации стереофонически озвученных фильмов звуки производятся двумя или несколькими динамиками в различных точках кинозала. По такому же принципу устроены и проигрыватели для стереофонических граммофонных пластинок.

## ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Вы, наверное, замечали, как изменяется звук сирены электропоезда, когда тот проносится мимо платформы, на которой вы стоите. Когда поезд приближается, тон сирены высокий и тревожный; когда же поезд пронесется мимо, ее звук резко меняется: становится более низким, как бы успокаивающим. Сирена создает в воздухе одинаковое количество колебаний и при приближении поезда, и при его удалении, скажем 100 *гц*. Но, приближаясь к вашему уху, она как бы догоняет свой звук, а удаляясь, как бы «увозит» его с собой.

Скорость звука — 340 *м/сек*, скорость поезда примем для простоты расчета в 34 *м/сек*. Предположим, что сирена, приближаясь к вам, гудит 1 *сек*, за это время она возбудит 100 колебаний; если бы поезд не двигался, вы услышали бы звук с частотой в 100 *гц*. Но поезд приближается. Допустим, что сирена начала гудеть за 340 *м* до платформы. Первое из ее колебаний ваш слух уловит ровно через секунду. Но она гудит-то всего 1 *сек*, и за эту секунду поезд промчится 34 *м*. Последнее колебание произойдет в 306 *м* от вас, и вы его услышите через $\frac{306}{340}$ *сек*, т. е. через 0,9 *сек*. Со вре-

мени, когда вы услышали первое колебание, прошло всего 0,9 *сек*, так как сирена перестала гудеть, когда вы услышали ее первое колебание. Таким образом, все 100 колебаний вы восприняли за 0,9 *сек*, а частота услышанного вами звука стала $\frac{100}{0{,}9}$ *гц*, т. е. 111 *гц*. Повторив те же рассуждения для удаляющегося поезда, мы найдем, что частота звука должна уменьшиться до 91 *гц*. Разница в частотах звука при приближении и при удалении поезда равна $\frac{2}{9}$ от основной частоты — это почти два тона музыкального ряда. Если бы скрипач взял на промчавшемся поезде ноту *ре*, то, пока поезд приближается, мы слышали бы *ми*, а когда поезд уже удаляется — *до*.

Изменение частоты звука вследствие эффекта Доплера можно подсчитать по формуле:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 \pm \frac{u}{w}},$$

где $u$ — скорость, с которой движется источник распространяющегося звука, $w$ — скорость звука в воздухе (340 *м/сек*), $\nu_0$ — частота источника звука, $\nu$ — слышимая частота. Знак «минус» в знаменателе относится к приближающемуся источнику звука, знак «плюс» — к удаляющемуся. (Об эффекте Доплера см. также в ст. «Свет».)

А что будет, если источник звука летит на вас со скоростью звука или даже скорее, чем звук? Когда в небе проносится реактивный самолет, он обгоняет производимый им грохот. Сначала вы увидите летящий низко самолет, а затем уже, когда он скроется за горизонтом, до вас дойдет звук значительно более низкий, чем тот, который можно услышать на аэродроме при старте.

## УДАРНАЯ ВОЛНА

Пока самолет летит медленнее звука, все происходит по формуле Доплера: он догоняет свой звук, частоты соответственно изменяются. Как только самолет достиг скорости звука, он начинает двигаться вместе со звуком. Но вот он увеличивает скорость, обгоняет звук. Все звуковые колебания воздуха должны оставаться сзади самолета, в конусе, угол которого тем меньше, чем скорость самолета больше скорости звука.

Но так происходило бы, если бы самолет возбуждал только слабые возмущения в воздушной среде, такие, как звук. Но самолет — источник очень сильных возмущений. При полете со сверхзвуковой скоростью воздух перед летящим телом уплотняется, и в этом слое воздуха резко возрастают и давление и температура. Этот слой даже удается сфотографировать, настолько в нем отличны и плотность и коэффициент преломления от обычного воздуха. Скорость звука в таком слое тоже меняется, она становится больше скорости самолета. Возникает так называемая ударная волна, она намного обгоняет самолет. Распространяясь, ударная волна затихает, и ее скорость сравнивается с обычной звуковой; следовательно, она уже отстает от самолета.

Иногда в безоблачный день вы слышите будто удар грома. С удивлением ищете в небе грозовое облако, но, приглядевшись, видите вместо него серебристую точку... Это — скоростной самолет, а удар «грома» — остатки его ударной волны, давно уже превратившейся в звуковую. Если такой самолет пролетит на высоте в 20 *м* вдоль колонны автомобилей, идущих по шоссе, мощная ударная волна разобьет все автомашины и сбросит их остатки в кювет. (О том, как образуется ударная волна, рассказано в ст. «Крылатый полет».)

## РЕЗОНАТОРЫ

Чтобы раскачать качели, надо их подталкивать в такт с их движением. Если толкать как попало — не в такт, — сильно раскачать не удастся. То же самое происходит с любыми колебаниями, например со звуковыми волнами, с волнами на воде.

Неподалеку друг от друга поставлены два камертона, настроенные на одну и ту же частоту колебания. Если один из камертонов заставить звучать, его звуковая волна раскачает и другой камертон. Это явление называется **резонансом**. Прекратив звучание первого камертона, вы можете услышать, что второй некоторое время продолжает звучать. Но камертон, настроенный на другую волну, не отзовется на звучание первого, не будет **резонировать**.

Резонанс широко используется в акустике. Дека рояля, корпус скрипки, раструб валторны, радиорупор — все это резонаторы. Звук одной только скрипичной струны не слышен будет в концертном зале, его во много раз усиливает резонатор — корпус скрипки. Как резонатор действует и сам концертный зал.

Звучащее тело преобразует не всю полученную им энергию в энергию звука. Резонатор увеличивает коэффициент такого преобразования. Корпус скрипки собирает слабые звуки и раскачивает ими основной звук, как качели. Кроме того, резонаторы музыкальных инструментов придают звуку своеобразный **тембр,** окраску, мягкость звучания своими **обертонами.**

Но форма наилучшего резонатора остается до сих пор загадкой для науки. Почему в одном зале слышны все звуки, издаваемые скрипкой, а в другом, с такой же кубатурой, некоторые звуковые оттенки пропадают? Почему, слегка изменив форму у корпуса скрипки, можно намного усилить ее звук? Почему скрипки, изготовленные в XVII — XVIII столетиях итальянскими мастерами Амади, Страдивари и Гварнери, сейчас еще пока невозможно превзойти? Все это предстоит разгадать ученым.

## МУЗЫКАЛЬНЫЕ ЗВУКИ

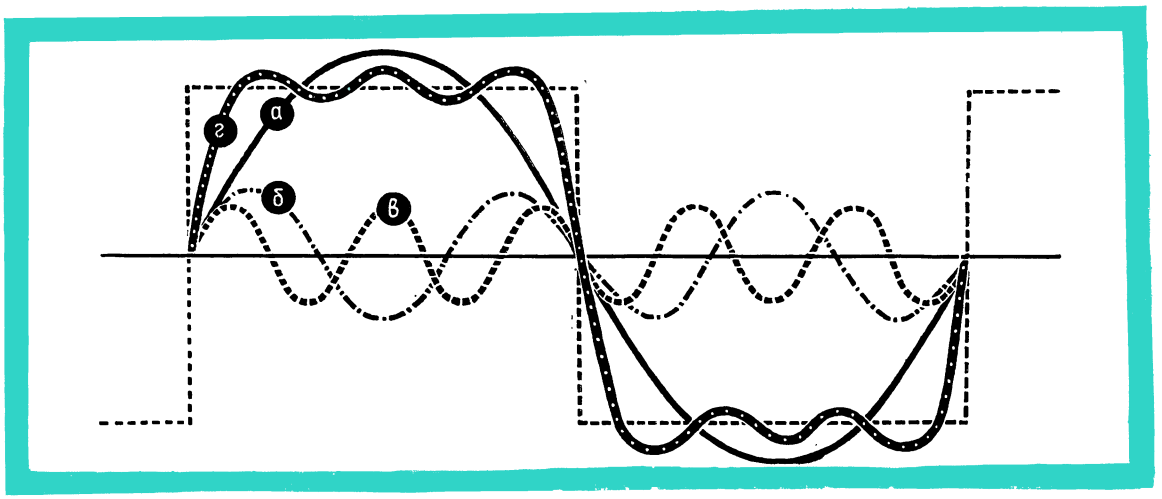
Мы с удовольствием слушаем песню, игру пианиста или скрипача, духовой оркестр, играющий в отдалении. Все эти звуки мы называем **музыкой.** Но редко встречаются люди, которым приятны визг, скрежет, грохот. В науке музыкальным называется тот звук, в котором изменение акустического давления, воспринимаемое ухом, упорядочено и, кроме того, повторяется регулярно, через равные промежутки времени. Звук перестает быть музыкальным, и его называют **шумом,** если звуковое давление изменяется в нем беспорядочно.

В каждом музыкальном звуке есть тон и тембр. Понятие **звуковой тон** ввел в акустику Галилео Галилей. Тон звука определяется частотой, с которой изменяется давление в звуковой волне. Небольшая частота колебаний соответствует **низкому тону,** большая частота колебаний — **высокому тону.**

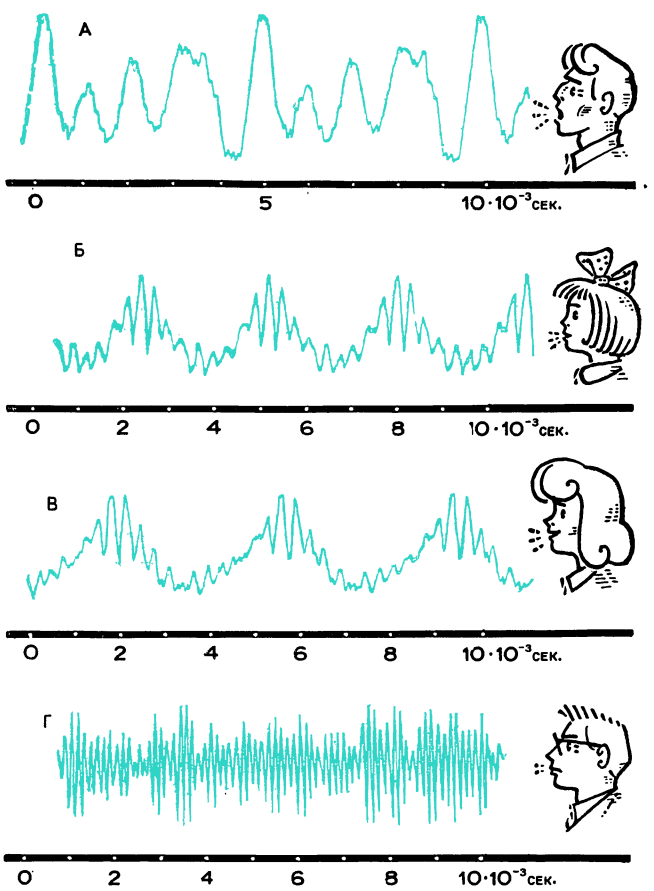
Если бы вибрирующие тела создавали при звучании в каждый момент только один тон, мы не смогли бы отличать голос одного человека от голоса другого, а все музыкальные инструменты звучали бы для нас одинаково. Всякое вибрирующее тело создает одновременно звуки нескольких тонов и при этом различной силы. Самый низкий из них называют основным тоном; более высокие тона, сопровождающие основной, — обертонами. В совместном звучании основной тон и обертоны создают тембр звука. Каждому музыкальному инструменту, каждому человеческому голосу присущ свой тембр, своя «окраска» звука. Один тембр отличается от другого числом и силой обертонов. Чем больше их в звучании основного тона, тем приятнее тембр звука.

Ухо человека способно анализировать звук, т. е. разбираться в совокупности тонов и обертонов, и это позволяет ему отличать один тембр от другого.

Если высокие обертоны преобладают в человеческом голосе над низкими, говорят, что в голосе «слышится звучание металла». Когда же преобладают низкие обертоны, голос назы-




**У гармонических колебаний *а*, *б* и *в* различные амплитуды, а их частоты относятся как *1 : 3 : 5*. При одновременном звучании они слагаются и образуют сложное периодическое колебание *г*.**




**Человеческий голос — это сложное колебание, состоящее из многих простых колебаний различного тона и громкости: *А* — гласная «а», произнесенная мужским голосом, основная частота — 200 колебаний в секунду; *Б* — гласная «и», высокий голос девочки, основная частота —350 колебаний в секунду; *В* — это тоже «и», только произнесенное низким женским голосом; основная частота —250 колебаний в секунду; *Г* — так построена волна «беззвучной» согласной «с», ее частота — около 6000 колебаний в секунду.**

вают «мягким», «бархатистым». При этом нельзя упускать из виду, что восприятие голоса слухом зависит не только от частоты колебаний и силы звука, не только от тонов и обертонов, но и от чувствительности уха к тонам различной высоты.

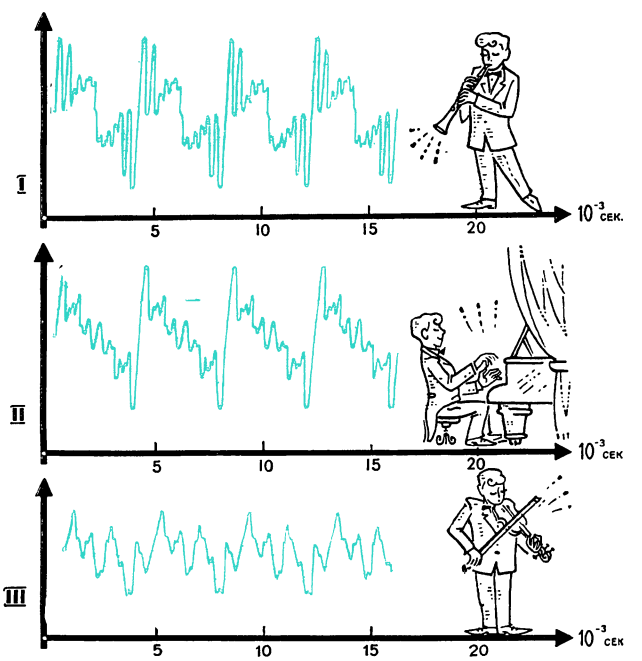
## МУЗЫКАЛЬНЫЕ СОЗВУЧИЯ

В музыкальных произведениях — симфониях, концертах, сонатах — одновременно звучит не один тон, а несколько, и каждый из них сопровождается своими обертонами. Такое явление называется **созвучием.**

Самое простое созвучие — одновременное звучание двух тонов. У каждого из них своя частота колебаний. Отношение двух таких частот называют **интервалом.** Если это отношение равно 1 : 1, интервал будет **унисоном.** Отношение 1 : 2 — **октава,** 2 : 3— **квинта,** 3 : 4— **кварта,** 4 : 5 — **большая терция,** 5 : 6 — **малая терция.**

Если частоты двух тонов очень мало отличаются друг от друга, их совместное звучание создает своеобразное завывание — **«биение»:** совместное звучание периодически то усиливается, то ослабляется. Количество усилений в одну секунду называют **частотой биений.** Если частота биений не больше четырех в секунду, они не мешают слуховому восприятию. Если же частота достигает трех десятков (и особенно тридцати трех), звуковое ощущение нестерпимо. Однако при большой частоте (около 130 в секунду) влияние биений на ощущение слуха исчезает.

При звучании струн скрипки, виолончели, рояля всегда слышны, кроме основного тона, верхние обертоны. Предположим, что одновременно звучат две струны, их основные частоты— 200 и 400 *гц* и у каждой струны 5 обертонов.




**Одна и та же нота — *до* первой октавы — звучит на разных музыкальных инструментах по-разному. Различие зависит от тембра, который придается ноте инструментом: *I* — так волна этой ноты выглядит, когда ее воспроизводят на кларнете; *II* — та же нота, воспроизведенная на пианино; *III* — *до* первой октавы на скрипке.**

У первой струны:

| | |
|---|---|
| основной тон | — 200 *гц*, |
| первый обертон | — 400 *гц*, |
| второй обертон | — 600 *гц* |
| третий обертон | — 800 *гц*, |
| четвертый обертон | — 1000 *гц*, |
| пятый обертон | — 1200 *гц*. |

У второй струны:

| | |
|---|---|
| основной тон | — 400 *гц* |
| первый обертон | — 800 *гц*, |
| второй обертон | — 1200 *гц*, |
| третий обертон | — 1600 *гц*, |
| четвертый обертон | — 2000 *гц*, |
| пятый обертон | — 2400 *гц*. |

Отношение частот у основных тонов равно 1 : 2, т. е. октава. При совместном звучании обеих струн три тона у них совпадают: 400, 800 и 1200 *гц*. Чем больше в совместном звучании одинаковых тонов, тем больше сродства в созвучии струн. В этом случае биений нет совсем. Такое созвучие называют **консонансом.**

Если вторую струну заменить третьей, у которой:

| | |
|---|---|
| основной тон | — 410 *гц*, |
| первый обертон | — 820 *гц*, |
| второй обертон | — 1230 *гц*, |
| третий обертон | — 1640 *гц*, |
| четвертый обертон | — 2050 *гц*, |
| пятый обертон | — 2460 *гц*, |

то совместные звучания первой и третьей струн будут давать биения: 400 и 410 *гц*, 800 и 820 *гц*, 1200 и 1230 *гц*. Частота биений — 10, 20 и 30 *гц*. Октава разрушена, и получился **диссонанс,** который наше ухо воспримет как неприятное завывание.

Изучение интервалов, которые дают лучшие консонансы, привело к образованию **звуковой гаммы,** где отношение частот строго определено. Существует много разновидностей гамм, у большинства из них отношение частот легко изобразить как восходящий или нисходящий ряд, как арифметическую пропорцию. Например, мажорная, или диатоническая, гамма включает тоны, частоты которых относятся как

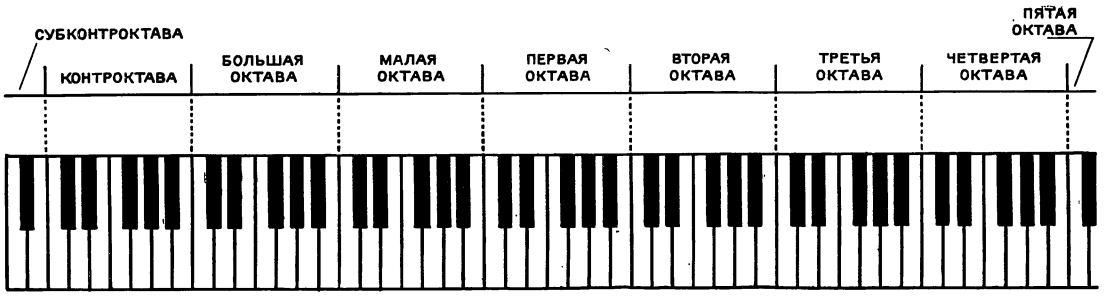
$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8}.$$

Звук, частота которого 65 *гц*, называют *до* большой октавы. Впрочем, в некоторых странах частота *до* другая, но ненамного отличается от 65 *гц*. Если мы, например, будем считать, что частота *до* большой октавы 64 *гц*, то у *до* малой октавы частота будет 128 *гц*, а у *до* первой октавы — 256 *гц*.

Если принять *до* первой октавы за основной тон, то частоты остальных шести тонов диатонической гаммы легко высчитать:

| | |
|---|---|
| *до* | — 256 *гц*, |
| *ре* | — 288 *гц*, |
| *ми* | — 320 *гц*, |
| *фа* | — 341,33 *гц*, |
| *соль* | — 384 *гц*, |
| *ля* | — 426,66 *гц*, |
| *си* | — 480 *гц*. |

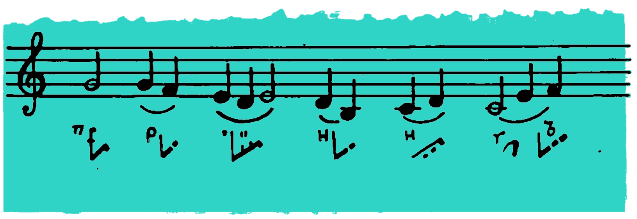
Эти частоты колебаний соответствуют произвольно определенной частоте для *до* большой октавы — 64 *гц*. На практике рассчитывают тоны диатонической гаммы по частоте колебаний *ля* первой октавы. До недавнего времени частоту для этого *ля* определяли в 435 *гц*. Теперь принято считать *ля* первой октавы звуком с частотой 440 *гц*. Этот звук можно услышать по радио, когда передают сигналы для настройки музыкальных инструментов. Впрочем, для музыки важно не точное количество колебаний для того или иного звука, а соотношение частот, т. е. величина интервала.




**Клавиатура фортепьяно.**

## ОБОЗНАЧЕНИЕ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ

В глубокой древности звуки мелодий записывали буквами, в средние века — особыми значками, **невмами**, которые приблизительно указывали повышение и понижение тонов. Для более точного определения высоты тона к невмам стали приписывать цветные черточки. Невмами записывали только вокальные мелодии, но эта запись лишь приблизительно указывала певцу последовательность повышений и понижений тона. В XI в. итальянец Гвидо д'Ареццо изобрел более точную систему записи звуков на четырех линейках. Он же дал названия для большинства современных нот. Только в XIV в. появилась запись нот на пяти линейках — **нотоносцах**. Кроме пяти основных линеек, применяют 5 добавочных вверху и 5 внизу. Ноты записываются на линейках и между ними. Что означают линейки, указывает **ключ**, который находится слева на основных линейках. Для фортепьянной музыки характерны два ключа— **скрипичный** и **басовый**. Для записи хоровой и оркестровой музыки существуют и другие ключи: *до*, *соль*, *фа*.

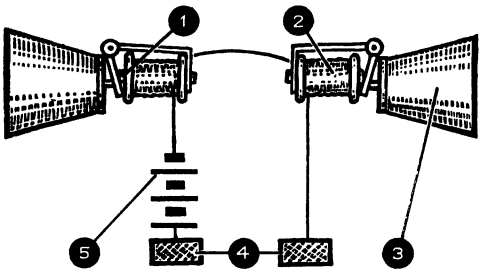


**Мелодия, записанная современными нотами и невмами.**

Основные линейки в нотной записи разбиты на равные части, так называемые **такты**. Они определяют длительность звучания. Размерность музыкального произведения и его тональность указаны рядом с ключом. Нотами обозначают только основной звук. Обертоны, определяющие тембр, окраску звука, зависят от музыкального инструмента.

## ПЕРЕДАЧА ЗВУКОВ НА РАССТОЯНИЕ И ЗАПИСЬ ЗВУКОВ

Читая книгу вслух, мы воспринимаем не голос автора, а только смысл его речи, воспроизводим его мысли. Нотная запись подобна словам, изображенным буквами, вернее, подобна фонетической транскрипции, которая применяется при изучении иностранных языков.




**Первый телефон Белла: *1* — якорь электромагнита; *2* — электромагнит; *3* — слуховая раковина (амбушюр); *4* — заземление; *5* — гальванический элемент.**

Ученые очень давно искали способы записывать живую человеческую речь и не читаемую, а слышимую музыку. Одновременно шли поиски передачи звуков за пределы прямой слышимости.

Оптический телеграф, передающий на такие расстояния запись слов, был изобретен еще в конце XVIII в. В 1832 г. впервые публично демонстрировался действующий электрический телеграф.

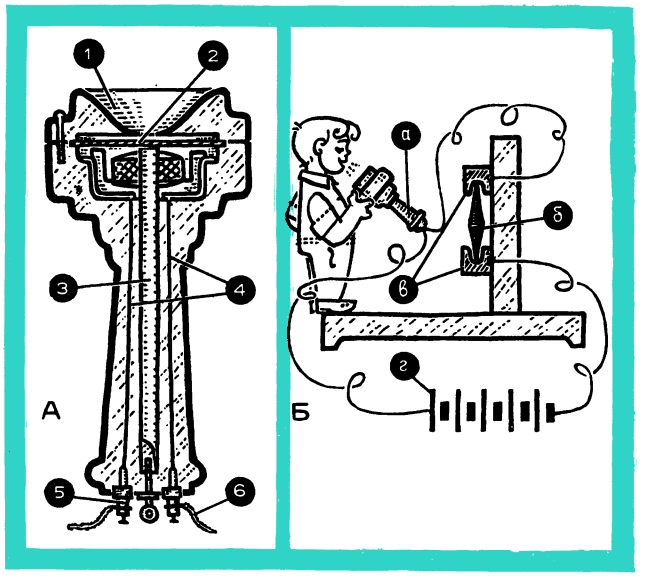
К 1855 г. относятся первые попытки передачи изображений по телеграфу. А непосредственные передача и запись звуков стали возможными только в последней четверти прошлого столетия. Первым предложил наиболее простой способ передачи звуков с помощью электромагнитной индукции американский физик А. Белл. Его изобретение — **телефон** — было зарегистрировано в 1876 г.

Намотав изолированную проволоку на железный сердечник и поднеся к такой катушке камертон, Белл обнаружил, что в проволоке возникает переменный ток. Это происходит потому, что колеблющаяся ножка камертона изменяет магнитное поле сердечника. Белл соединил концы обмоток у двух таких катушек и установил на обоих сердечниках по камертону. Когда один из камертонов возбуждал в своей катушке ток, намагничивался сердечник и в другой катушке. Изменения тока во втором сердечнике заставляли звучать и второй камертон. Но вначале прибор Белла воспроизводил звуки очень неясно. Они были похожи на жужжание. Для улучшения звука Белл воспользовался открытием немецкого физика Хладни, изучавшего колебания пластин.

Повторяя опыты Хладни, Белл заметил, что пластина отзывается и на человеческий голос. Тогда он поместил в своем приборе у сердечников не камертоны, а пластины. Одна из

них колебалась от воздействия голоса. Ее колебания превращались в импульсы электрического тока и воспроизводились второй пластиной. Но импульсы можно было передавать по проводу на большое расстояние. Изобретенное Беллом устройство действовало на сравнительно небольшом расстоянии и сильно искажало голос. В телефоне Белла для передачи звука использовалась энергия самого человеческого голоса. А она, как мы знаем, чрезвычайно мала, и только с ее помощью передать звуки на очень большое расстояние было нельзя — неизбежны были бы значительные потери энергии.

Эти недостатки устранил **микрофон**, изобретенный Юзом. Его микрофон представлял собой угольный стерженек, заостренные концы которого помещались внутри угольных же чашечек. Звуковые волны изменяли плотность контакта между концами стерженька и чашечками. В цепь телефона и микрофона Юза была включена батарея, мощность которой могла быть как угодно велика. Колебания человеческого голоса то увеличивали, то уменьшали сопротивление угольного стерженька, причем точно в такт со звуковыми колебаниями. Через катушку телефона, также в такт с колебаниями голоса, проходил ток батареи, вызывал колебания мембраны, которая уже преобразовывала их в колебания воздуха, т. е. в звук. Микрофон Юза был как бы краном в электрической цепи батарея — телефон; он позволял проходить току



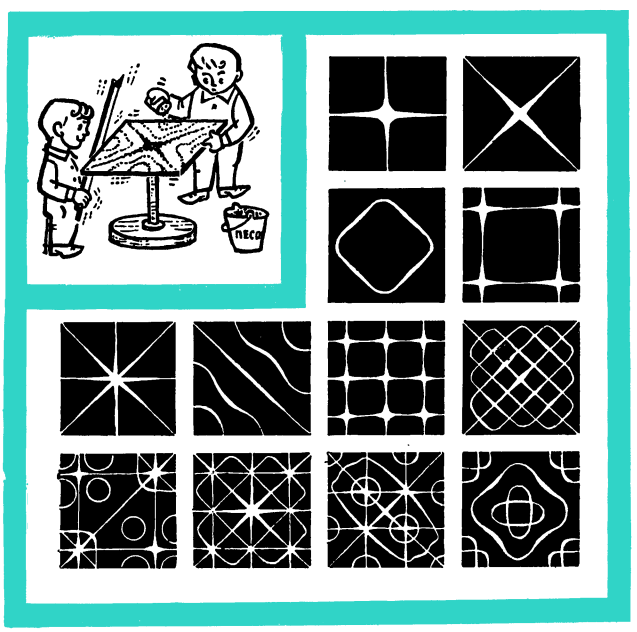

**Первые усовершенствования телефона:** *А* — телефонная трубка Белла: *1* — слуховая раковина (амбушюр), *2* — мембрана, *3* — постоянный магнит, *4* — проводник, *5* — зажим, *6* — линейный провод; *Б* — микрофон Юза: *а* — телефонная трубка Белла, *б* — угольный стержень, *в* — угольные колодочки, *г* — батарея.

через телефон в такт с колебаниями звука перед микрофоном, т. е. был управляющим элементом схемы, подобно современным радиолампам. В этом принципиальное различие микрофонов Юза и Белла.

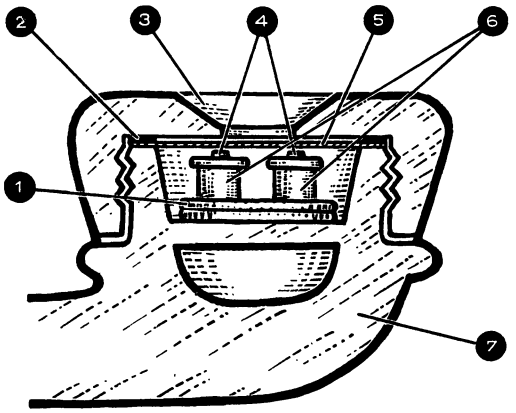
Почти таким же осталось и до сих пор устройство внутригородского телефона. В междугородней телефонной сети необходимо использовать усилители.

Телефон передавал звук на расстояние, но только по проводам, по которым шел электрический ток. Гигантским шагом вперед было изобретение передачи звуков с помощью электромагнитных радиоволн. Первым использовал эти волны для связи русский физик А. С. Попов. Передача с помощью электромагнитных волн осуществляется на любые расстояния — мы слышим голос наших космонавтов и наверняка услышим голоса людей, высадившихся на других планетах.

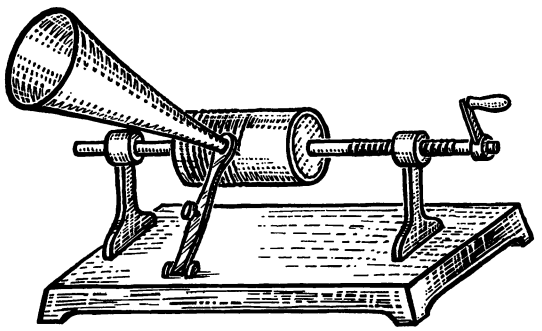
Сущность передачи звука с помощью радиоволн заключается в том, что звуковые колебания преобразуются микрофоном в колебания электрического тока. Этими колебаниями (их называют колебаниями низкой частоты) управляет излучение радиоволн с передатчиками (как говорят, **модулируют ими** радиоволны). Модулированные звуковой частотой радиоволны принимаются радиоприемником, где они усили-




**Хладниевы фигуры.**




Современная конструкция телефонной трубки: *1* — постоянные кольцеобразные магниты; *2* — прокладка; *3* — слуховая раковина; *4* — полюсные надставки; *5* — мембрана; *6* — обмотка; *7* — корпус микротелефона.



Фонограф Эдисона.

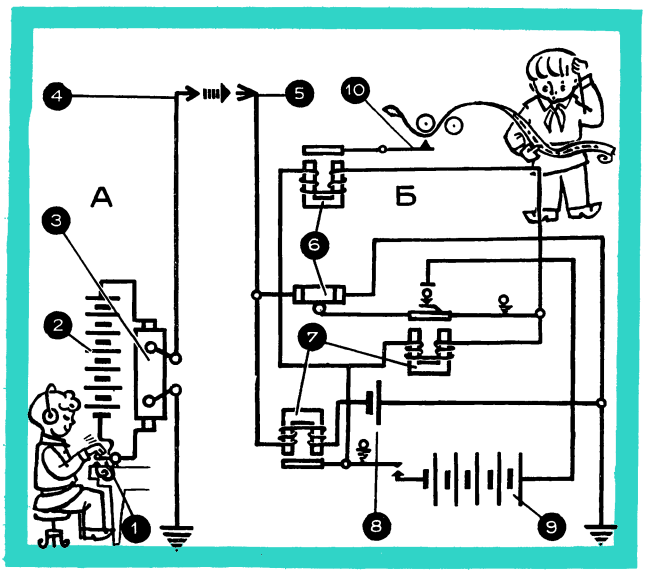



Схема первой радиопередачи, предложенная А. С. Поповым: *А* — передатчик: *1* — ключ, *2* — батарея, *3* — источник высокого переменного напряжения, *4* — передающая антенна; *Б* — приемник: *5* — приемная антенна, *6* — когерер, *7* — электрический магнит, *8* — элемент, *9* — батарея, *10* — телеграфный аппарат.

ваются, из них «отсеиваются» звуковые колебания, затем они снова усиливаются и преобразуются в слышимые нами звуковые колебания (см. ст. «Радио»).

Почти одновременно с изобретением радиосвязи были найдены способы, как записывать и хранить подлинные звуки. Помните, в старой немецкой сказке барон Мюнхгаузен, путешествуя по России, подобрал на дороге замерзшую дудочку, а в теплой избе из нее полились оттаявшие звуки. Такая сказочная мечта сбылась в начале нашего века. Впервые ее осуществил Эдисон. Справедливости ради следует отметить, что изобретение это могло быть сделано за сотню лет до Эдисона — развитие физики уже тогда было для этого достаточным. Но чтобы открыть не замеченное когда-то, понадобился гений Эдисона.

Эдисон воспользовался свойством тонкой металлической пластинки воспринимать колебания окружающей среды. На такой пластинке Эдисон укрепил иглу из сапфира. Она едва касалась цилиндра, покрытого оловянным листом. При вращении цилиндра игла слегка царапала его поверхность, а сам цилиндр смещался вдоль своей оси. Таким образом, игла процарапывала на цилиндре спираль. Пластинка под действием звуковой волны колебалась и с различной силой прижимала иглу к цилиндру. Так звуки записывались на цилиндр. Чтобы воспроизвести их снова, достаточно было поместить иглу в начале спирали и с той же скоростью вращать цилиндр. Игла, скользя по борозде, заставляла пластинку воспроизводить звуковые колебания.

При дальнейшем усовершенствовании **фонографа** олово на поверхности цилиндра заменили воском. Затем цилиндр заменили плоской восковой пластинкой, на которую борозда также наносилась по спирали, но колебания иглы шли не в глубину борозды, а по ее ширине. Этот прибор был назван **граммофоном**. У него было огромное преимущество перед фонографом: стало возможным копировать запись звуков с восковых пластинок на пластмассовые.

В наше время звук записывается на дисках из мягкого, воскообразного вещества. С этого диска методом гальванопластики снимается металлическая копия, и уже на копии штампуются пластмассовые пластинки. Так можно получить много экземпляров одной и той же звукозаписи.

Записывать звук можно и с помощью света. Для этого использовано несколько различных природных явлений.

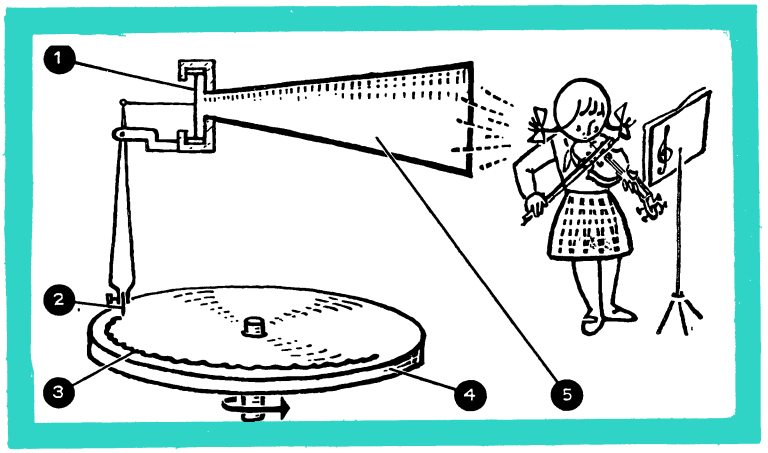



**Схема механической записи звука:** *1* **— мембрана;** *2* **— резец;** *3* **— звуковая дорожка;** *4* **— диск;** *5* **— рупор.**

В зависимости от силы света, падающего на эмульсию фотопленки, на ней после проявления получаются то совсем непрозрачные, то лишь затемненные и даже совершенно прозрачные места. На это и обратили внимание физики, когда искали способ записывать звук светом. Звуковые колебания надо было превратить в колебания электрического тока, питающего, скажем, электролампочку. Микрофон включили в цепь лампочки и ее мигающим светом стали освещать движущуюся в приборе фотопленку. После проявления негатива на пленке оказалась светлая полоса с неравномерной прозрачностью. Где света попало больше, полоса была темнее, где меньше — светлее. На позитивной пленке изображение света и тени оказалось на черной полосе — на так называемой звуковой дорожке. Это и была «фотография» звука.

Чтобы «фотография» зазвучала, через движущуюся пленку пропускают пучок света от лампочки с постоянной яркостью. Так как прозрачность полосы на пленке различна, то и проходящий через нее свет становится то ярче, то тусклее. Мигающий свет превращают в ток с помощью **фотоэлемента**. Сущность **фотоэффекта**, используемого в фотоэлементе, состоит в том, что свет способен выбивать из некоторых металлов электроны. При этом, если осветить пластинку, например, из цезия, она заряжается положительно, а в пространстве над нею появляются свободные переносчики электрического тока — электроны.

На основе этого явления создан прибор — фотоэлемент. Первые фотоэлементы были похожи на электроскоп. В стеклянном сосуде укреплены две металлические пластинки: одна соединена с отрицательным полюсом электрической батареи, другая — с положительным. Под действием света из отрицательно заряженной пластинки вырываются электроны, которые притягиваются другой пластинкой. Гальванометром можно установить, что величина тока в цепи изменяется в зависимости от интенсивности света, падающего на отрицательно заряженную пластинку. Узкий пучок света проходит через звуковую дорожку на фотоэлемент. Вызванный им электрический ток идет по обмотке электромагнита. И тот с различной силой (в зависимости от яркости упавшего на элемент света) притягивает мембрану и заставляет ее воспроизводить звуковые колебания.

Запись звука светом применяется в кино. Звуковая дорожка находится на краю киноленты: свет, проходящий через нее, направляется не на экран, а на фотоэлемент.

Вместо фотоэлемента, описанного выше, можно поставить фотосопротивление. В зависимости от силы света (освещенности) оно может изменять свое электрическое сопротивление и пропускать через себя то больший, то меньший ток.

Сравнительно недавно удалось получить **магнитную запись звука**. Для этого использовали электромагнитную индукцию. На тонкой алюминиевой мембране укреплена между полюсами постоянного магнита легкая проволочная катушка. Мембрана, совершая звуковые колебания, приводит катушку в движение и возбуждает в ней индукционный ток. Этот ток подается на обмотку электромагнита; перед ним протягивается железная проволока или пластмассовая

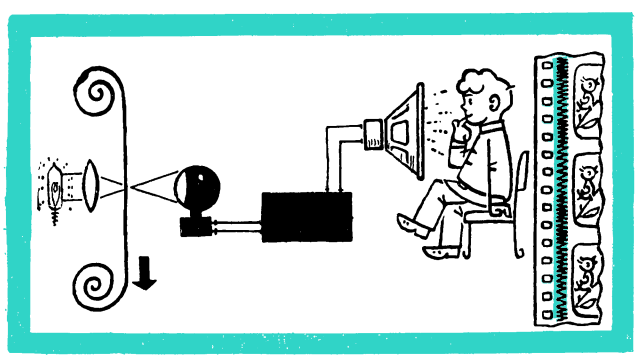
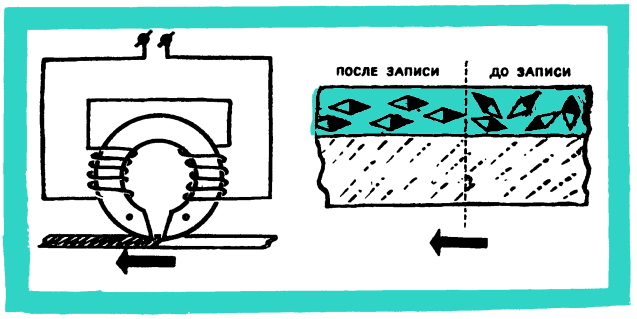


**Схема воспроизведения звука с кинопленки. Справа — звуковая дорожка.**




**Запись звука на магнитной ленте.**

лента, в состав которой входит тончайший порошок железа или другого ферромагнетика. Проволока или лента намагничивается тем сильнее, чем больший ток возбужден в катушке звуком.

Чтобы воспроизвести по такой записи звук, надо протянуть ленту с той же скоростью вблизи электромагнита. Произойдет обратный процесс. В обмотке возникает ток, изменяющий свою величину в зависимости от намагниченности ленты. После усиления этот ток пропускают через обмотку другого электромагнита, который заставляет мембрану совершать колебания, и звук воспроизводится.

У магнитной записи немало преимуществ перед световой. Когда звук записан светом, фотопленку надо проявить и отпечатать. Снять запись с фотопленки уже нельзя. Магнитную запись можно тотчас же прослушать, а затем стереть ее с пленки. Для этого достаточно протянуть пленку около магнита, по которому течет быстропеременный ток. Пленка многократно перемагнитится, следы записанного звука исчезнут, и пленка пригодна для новой записи.

Чтобы записывать и воспроизводить звук, создан удобный прибор — **магнитофон** и специальная пластмассовая пленка, содержащая мелкозернистый ферромагнитный порошок. Магнитная запись широко применяется в радиопередачах. Многое из того, что передается по радио, удобнее предварительно записать на магнитофонную пленку, а затем уже воспроизвести перед микрофоном для передачи в эфир.

## НЕСЛЫШИМЫЕ «ЗВУКИ»

Колебания с частотой менее 16 *гц* не воспринимаются нашим слухом — это **инфразвук**. Не слышны также колебания с частотой более 20 000 *гц* — это **ультразвук**. Когда были созданы высокочувствительные приемники звуков для самых различных частот, обнаружилось, что инфра- и ультразвуки распространены в природе так же широко, как и звуки слышимые. Выяснилось, что их излучают и воспринимают живые существа на суше, в воздухе и в воде и используют их для своих «переговоров». Собаки, например, воспринимают ультразвуки с частотой до 40 *кгц*. Этим пользуются дрессировщики, чтобы подавать собаке команду, неслышимую людьми. Установленные в море приемники ультразвука обнаруживают его при появлении «плавающих островов» планктона. Оказалось, что крохотные веслоногие рачки в этом планктоне создают ультразвуковые волны, потирая лапку о лапку. В море были обнаружены и слышимые звуки: их издают некоторые рыбы (см. в т. 4 ст. «Звуки моря»). Издает звуки и само море. Их называют «голосом моря». Частота таких звуков меньше 16 *гц*. Порывистый ветер где-то далеко зарождает шторм, приводит в движение поверхность воды. Сжатие и разрежение морской волны передаются в пространство над водой и порождают инфразвуковые волны.

Инфразвуковое излучение ощущают различные жители моря: медузы, ракообразные существа, морские блохи и гоморусы. Прибрежные животные, услышав «голос моря», прячутся в морской глубине или в водорослях. Еще раньше узнают о приближении шторма морские животные, находящиеся вдали от берега, потому что звук вообще распространяется в воде в 5 раз быстрее, чем в воздухе,— со скоростью 1460 *м/сек*.

Инфразвук мы не слышим, но можем его ощущать. Иногда в троллейбусе компрессор воздушного тормоза начинает работать ненормально, и пассажиры, хотя и не слышат звук, ощущают боль в ушах. Компрессор издает инфразвук. Обычно инфразвук содержит обертоны, которые мы можем слышать. Например, в грохоте грома основная масса звуковой энергии сосредоточена в инфразвуковой области, мы же слышим в громе только обертоны, более высокие, чем инфразвук.

Инфразвук по сравнению со слышимыми звуками мало поглощается воздухом, потому инфразвуковая волна распространяется на очень далекие расстояния. Приборами улавливаются инфразвуковые волны на большом расстоянии от его источника. Интересно, что на своем пути инфразвук очищается от своих обертонов, так как воздух поглощает их.

Инфразвук имеет большое значение в военном деле. Улавливая его приборами, весьма

точно определяют место, откуда действует дальнобойная артиллерия.

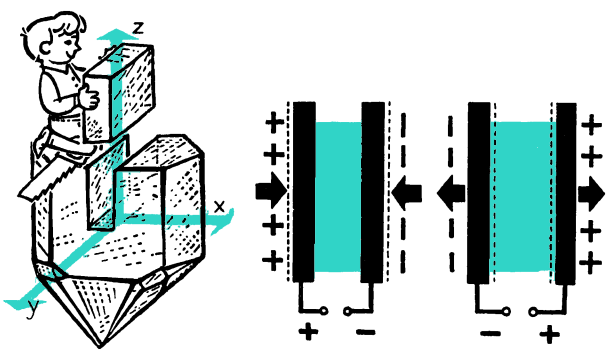
В воде инфразвук поглощается также значительно слабее слышимых звуков и потому может быть уловлен за много сотен километров. Это помогает рыболовецким судам быстро находить стаи рыб, издающих инфразвук.

На очень большой морской глубине, куда не проникает свет, живут рыбы, у которых нет зрения. Но они возмещают его способностью издавать ультразвуковые волны и воспринимать эхо от этих волн. Это позволяет им не только ориентироваться при движении, но и охотиться на других рыб.

Ультразвуком пользуется и летучая мышь. Наблюдая ее стремительный полет, невольно ожидаешь, что она вот-вот налетит на ствол дерева или стену здания. Но каждый раз, встречая на пути препятствие, она стремительно взмывает вверх или круто поворачивает в сторону. Исследования естествоиспытателей доказали, что зрение у летучей мыши весьма слабое. Она почти слепа. Но умение пользоваться ультразвуком и его отражением от предметов помогает ей ориентироваться в сложной обстановке и на лету ловить добычу — мелких мошек.

## ИЗЛУЧАТЕЛИ УЛЬТРАЗВУКА

Чтобы излучатель мог создавать упругие волны ультразвука, частота его колебаний должна превышать 20 000 *гц*. Такие излучатели открыты уже давно, но применяться стали совсем недавно. В 1880 г. французские ученые братья Пьер и Поль Кюри исследовали свойства кристаллов. Они заметили, что, если кристалл кварца сжать с двух сторон, на его гранях, перпендикулярных направлению сжатия, возникают электрические заряды: на одной грани — положительные, на другой — отрицательные. Таким же свойством обладают кристаллы турмалина, сегнетовой соли, даже сахара. Заряды на гранях кристалла возникают и при его растяжении. Но на грани, дававшей при сжатии положительный заряд, при растяжении будет отрицательный, и наоборот.




**Получение кварцевой пластинки и образование на ней пьезоэлектричества. Основная часть кварцевого кристалла — шестигранная призма, стрелками показаны основные ее кристаллографические оси.**

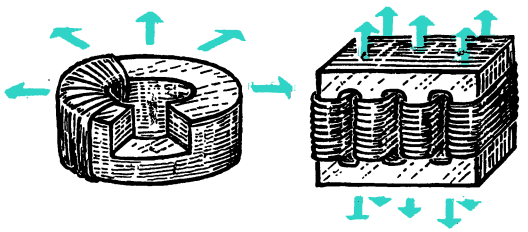
Такое возникновение электрических зарядов на кристаллах было названо **пьезоэлектричеством** (от греческого слова «пьезо» — давлю). Кристалл, имеющий такое свойство, называют пьезоэлектриком. В дальнейшем братья Кюри обнаружили, что пьезоэлектрический эффект обратим: если на гранях кристалла создать разноименные электрические заряды, он либо сожмется, либо растянется, в зависимости от того, к какой грани приложен положительный и к какой отрицательный заряд.

Пьезоэлектричество впервые было практически применено лишь в мировой войне 1914—1918 гг. Французский ученый Поль Ланжевен предложил использовать это явление, чтобы обнаруживать подводные лодки. Винт лодки порождает при своем вращении упругие волны. Они распространяются в воде со скоростью 1460 *м/сек*. Если пьезоэлектрический кристалл, опущенный в воду, окажется на пути ультразвуковой волны, то волна сожмет его грани и на них появятся электрические заряды.

Ланжевен изобрел и излучатель ультразвуковых волн. Пробуя заряжать грани кварцевого кристалла электричеством от генератора переменного тока высокой частоты, он установил, что кристалл совершает при этом колебания в такт изменению напряжения тока. Одна пластинка кристалла излучает ультразвук очень малой мощности. Чтобы получить большую мощность колебаний, Ланжевен составил из многих кварцевых пластинок мозаичный слой. Кварцевую мозаику он вложил между двумя стальными листами. Они и скрепляли ее, и были электродами.

Чтобы увеличить амплитуду колебаний у пластинок кристалла, Ланжевен воспользовался явлением резонанса: если собственная частота колебаний пластинки совпадает с частотой колебаний напряжения на электродах, амплитуда колебаний на пластинке резко возрастает. Исследования Ланжевена дали возможность изготовлять кварцевые излучатели ультразвука различных частот.

Пьезоэлектрическими свойствами обладают не только кристаллы, но и керамика из титаната



Магнитострикционные излучатели.

бария. У керамических излучателей много преимуществ перед кварцевыми. Им можно придавать любые размеры и любую форму.

Ультразвук можно получать и другим способом. Еще в 1847 г. физик Джоуль, изучая магнитные свойства металлов, обнаружил, что железные и никелевые стержни изменяют свои размеры при перемагничивании электрическим током. Когда направление тока в обмотке изменяется, стержень то уменьшается, то увеличивается в такт изменениям в направлении тока. В окружающей среде при этом возбуждаются упругие волны, частота которых определяется колебаниями стержня. Это явление было названо **магнитострикцией** (от латинского слова «стриктус» — сжатие).

## ЗВУК НА СЛУЖБЕ У ЧЕЛОВЕКА

Физические явления изучаются не только для того, чтобы понять их сущность, но и для того, чтобы научиться ими управлять, чтобы с их помощью бороться со стихиями природы. Так действовал человек всегда со времен возникновения человеческого общества.

Одно из первых явлений природы, которое человек наблюдал, которое стремился понять,— это эхо. Очевидно, еще в раннем, каменном веке человек научился пользоваться этим явлением для ориентировки в горной местности.

Отражение звука от препятствий во многом похоже на полет мяча, брошенного на землю или на стену. Угол его падения равен углу отражения. В горном ущелье мы слышим многократное эхо. Это значит, что к нам приходят звуки, отраженные от нескольких скал. Если в горах крикнуть и отметить время до прихода эха, то легко определить расстояние до места, от которого звук был отражен. Для этого достаточно умножить скорость звука на засеченное время и это произведение разделить на два, так как за это время звук прошел «туда» и «обратно».

В 1887—1889 гг. звук впервые был применен для определения глубины моря. Источником звука был колокол, звучавший под водой. Результаты опытов не были утешительными: звук, отражаясь от дна, давал очень слабое эхо, еле слышное в общем шуме моря.

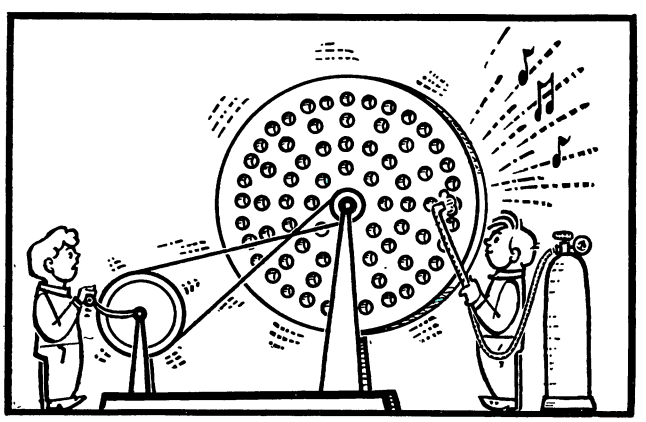
Колокол использовали для предупреждения кораблей во время тумана. Он звонил под водой в центре опасной при тумане бухты. Корабли, направляющиеся в гавань, опускали по бортам слуховые трубы, похожие на уши. Но звучание колокола оказалось и для этого слишком слабым.

Значительно сильнее звук дает сирена — вращающийся диск с отверстиями, через которые продувают струю воздуха. Колокол заменили сиреной.

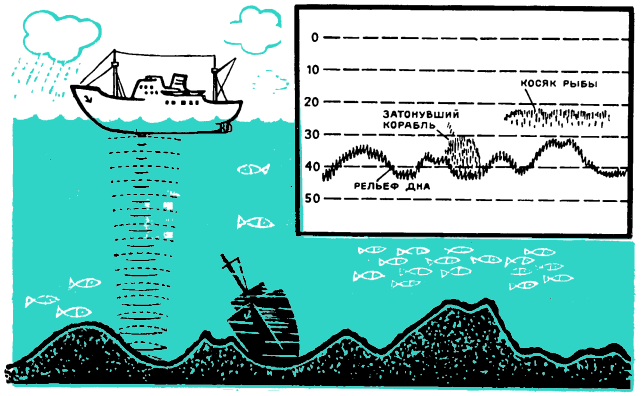
К измерению глубины моря с помощью эха вернулись несколько лет спустя. В 1912 г. был сконструирован специальный прибор — **эхолот**. У одного из бортов корабля взрывали в воде пороховой патрон, звук взрыва после его отражения от дна принимался на другом борту. Эхолотом можно было измерять глубины до 150 *м*. Эхолотом был заменен менее совершенный прибор — лот (канат с грузом на конце и метками длины).

Вскоре произошло событие, расширившее применение эхолота. В Атлантическом океане в сильный туман корабль-гигант «Титаник» столкнулся на полном ходу с огромным айсбергом. Корабль очень быстро затонул. С тех пор для обнаружения препятствий на пути кораблей стали пользоваться эхолотом. Его повернули из вертикального положения в горизонтальное. Зрение лоцмана, когда не видно ни зги, стали заменять эхолотом.

В наше время эхолот усовершенствован и называется уже **гидролокатором**. Он действует по



Принцип работы сирены.




**Запись рельефа дна с помощью ультразвукового эхолота.**

тому же принципу ультразвуковыми волнами: ультразвуковой луч, посланный излучателем, отражается от препятствия, возвращается обратно и улавливается звукоприемником. Посылая звук, регистрируют время. Зная, с какой скоростью распространяется ультразвук в воде, можно определить расстояние до препятствия и даже его форму. С помощью гидролокатора было найдено много затонувших кораблей. Усовершенствованный гидролокатор излучает ультразвук не непрерывно, а через определенные промежутки времени. Эхо улавливается несколькими приемниками, отстоящими друг от друга на некотором расстоянии. Все это позволяет более точно определить место препятствия перед кораблем или очертания морского дна.

Широко применяется ультразвук в металлургии. Он хорошо распространяется в металлах, и ультразвуковое эхо используется для определения качества металлических изделий. Если в таком изделии есть инородные вкрапления (раковины), ультразвуковой луч отражается от них, как от препятствия. Сконструирован специальный прибор — **ультразвуковой дефектоскоп**. Но этот прибор позволяет обнаружить лишь наличие дефекта и расстояние до него от поверхности изделия. Форму и размеры дефекта можно увидеть с помощью **ультразвукового микроскопа**. В таком приборе ультразвуковой луч «ощупывает» дефект в металле и дает его изображение на экране электронно-лучевой трубки, похожей на трубку в телевизоре.

Оба эти прибора работают на волнах очень высокой частоты. Зная примерно размеры дефекта, который должен быть обнаружен в металлическом изделии, легко рассчитать частоту волны, могущей его определить. Если применить ультразвук с самой малой частотой — 20 *кгц*, то длина его волны в металле (при скорости звука 5000 *м/сек*) будет:

$$\lambda = \frac{5000}{20\,000} = 0{,}25\ м.$$

Это значит, что волною такой частоты можно измерить дефект, размеры которого не меньше 0,25 *м*. Звуковые и ультразвуковые волны, так же как и все прочие волны в природе, не отражаются от препятствий с размерами меньшими, чем длина волны. Они их просто огибают. Это явление называется дифракцией.

## ВЕЩЕСТВО В ЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Звуковая или ультразвуковая волна, распространяясь в веществе, вызывает колебания его частиц. Амплитуда колебаний зависит от силы звука — чем больше сила звука, тем больше амплитуда смещения частиц. Частицы веществ, подвергнутых действию звукового поля большой силы, интенсивно колеблются. Если подвергнуть действию мощного ультразвука две несмешивающиеся жидкости, например масло и воду, то на границе взаимного соприкосновения они начинают интенсивно перемешиваться, как бы проникая друг в друга. При этом образуется эмульсия, состоящая из мельчайших капелек масла, распределенных в воде. Так получают, например, различные лекарства, а в пищевой промышленности — маргарин, майонез, различные соусы и т. п.

Используется ультразвук и при изготовлении светочувствительных эмульсий для фотопленки и фотобумаги. Он раздробляет зерна бромистого серебра и перемешивает их в каком-либо коллоиде, например в желатине. Чем мельче получаются зерна, тем большее увеличение допускает фотоснимок.

В других случаях ультразвук используют не для раздробления, а чтобы заставить слипнуться мельчайшие частицы, засоряющие жидкость или газ. Это возможно в том случае, если слипшиеся частицы не разрушаются в том же звуковом поле. Если воздух, в котором много пыли — твердых частиц, взвешенных в воздухе (сажи, цемента, золы и т. п.),— подвергнуть мощному воздействию ультразвука (с интенсивностью 0,2—0,5 *вт/см*$^2$), мельчайшие твердые частички слипаются друг с другом так прочно, что тот же ультразвук не может преодолеть силы их молекулярного взаимодействия. Образуются крупные частицы, кото-

рые уже легко улавливаются фильтрами или просто оседают под действием силы тяжести.

Если сфокусированный вогнутым излучателем пучок ультразвуковых волн с частотой от 0,8 до 2 *Мгц* направить из жидкости вверх, произойдет интересное явление. Мы уже знаем, звуковые волны не могут перейти из более плотной среды (воды) в менее плотную (воздух) — они полностью отразятся от поверхности раздела. При отражении поверхность воды будет испытывать давление. Стена, например, тоже, отражая мяч, испытывает давление. Возникает так называемое **давление звукового излучения** (не смешивать со звуковым давлением). Оно в сотни и тысячи раз меньше звукового давления, и природа его совершенно другая. Звуковое давление изменяется в каждой точке и распространяется радиально; давление звукового излучения всегда действует в одну сторону, и величина его неизменна, если не меняется сила звука. Давление излучения звука образует на поверхности жидкости своеобразный холм или горб высотой до 50 *см* (при помощи ультразвука интенсивностью в 50 $вт/см^2$). При этом некоторые жидкости интенсивно распыляются, образуя плотное облако тумана. Жидкость будто кипит. Сущность этого явления очень сложна и связана с образованием капиллярных волн на поверхности жидкости; они подобны морским волнам, только размеры их в миллионы раз меньше — доли микрона. Из гребней этих волн и образуются мельчайшие частички «ультразвукового тумана».

## КАВИТАЦИЯ

Применение ультразвука значительно расширилось после того, как было открыто явление кавитации. Уже давно было замечено, что гребные винты морских судов быстро изнашиваются при увеличении числа оборотов. Поверхность хорошо отполированного, не поддающегося ржавлению винта покрывалась мелкими щербинками. Гидродинамические свойства винта, т. е. способность его приводить судно в движение, резко ухудшались. Так же разрушались и лопасти гидротурбин. Причину этого явления удалось установить лишь после того, как обнаружили, что так же разрушается поверхность электродов, нанесенных на кварцевый пьезоэлектрик, если он излучает мощные ультразвуковые колебания.

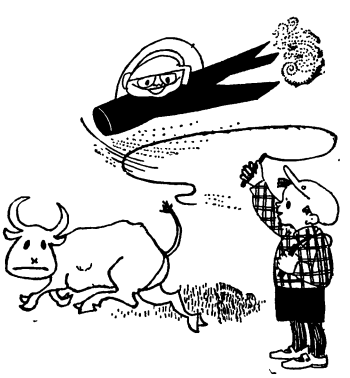
При работе гребного вала и лопастей гидротурбины создаются в жидкости мощные упругие колебания ультразвуковой частоты. В момент разрежения волны образуются в жидкости разрывы, заполненные растворенным в воде газом, — **кавитационные пузырьки**. Легче всего они возникают там, где есть частицы воздуха или каких-то примесей. В слое сжатия очень большое давление, оно вызывает кавитацию: разрывы в жидкости исчезают и происходит **гидравлический удар**. Эти гидравлические удары и разрушают металлическую поверхность винта или лопастей. Удар одного кавитационного пузырька слаб, но на поверхность металла обрушиваются тысячи таких ударов.

### Ударная волна сверхзвукового самолета и пастушеский кнут.

Полеты сверхзвуковых самолетов над населенными пунктами строго запрещены. Обычный самолет звуковые волны обгоняют и, распространяясь по всем направлениям, постепенно безобидно затухают. Самолет, летящий со скоростью более 1200 *км/час*, сам обгоняет свои собственные звуки. Рокот работающих моторов, свист и грохот рассекаемого крыльями воздуха, все звуковые волны сливаются в одну мощную ударную волну, в вершине которой быстрее звука летит самолет.

Достигая земной поверхности, ударная волна приносит много бед: из окон вылетают стекла, рушатся стены, от страшных ударов, сильнее грома, можно навсегда оглохнуть. Поэтому испытания сверхзвуковых самолетов проводят в пустынной местности, где ударные волны не могут причинить вреда.

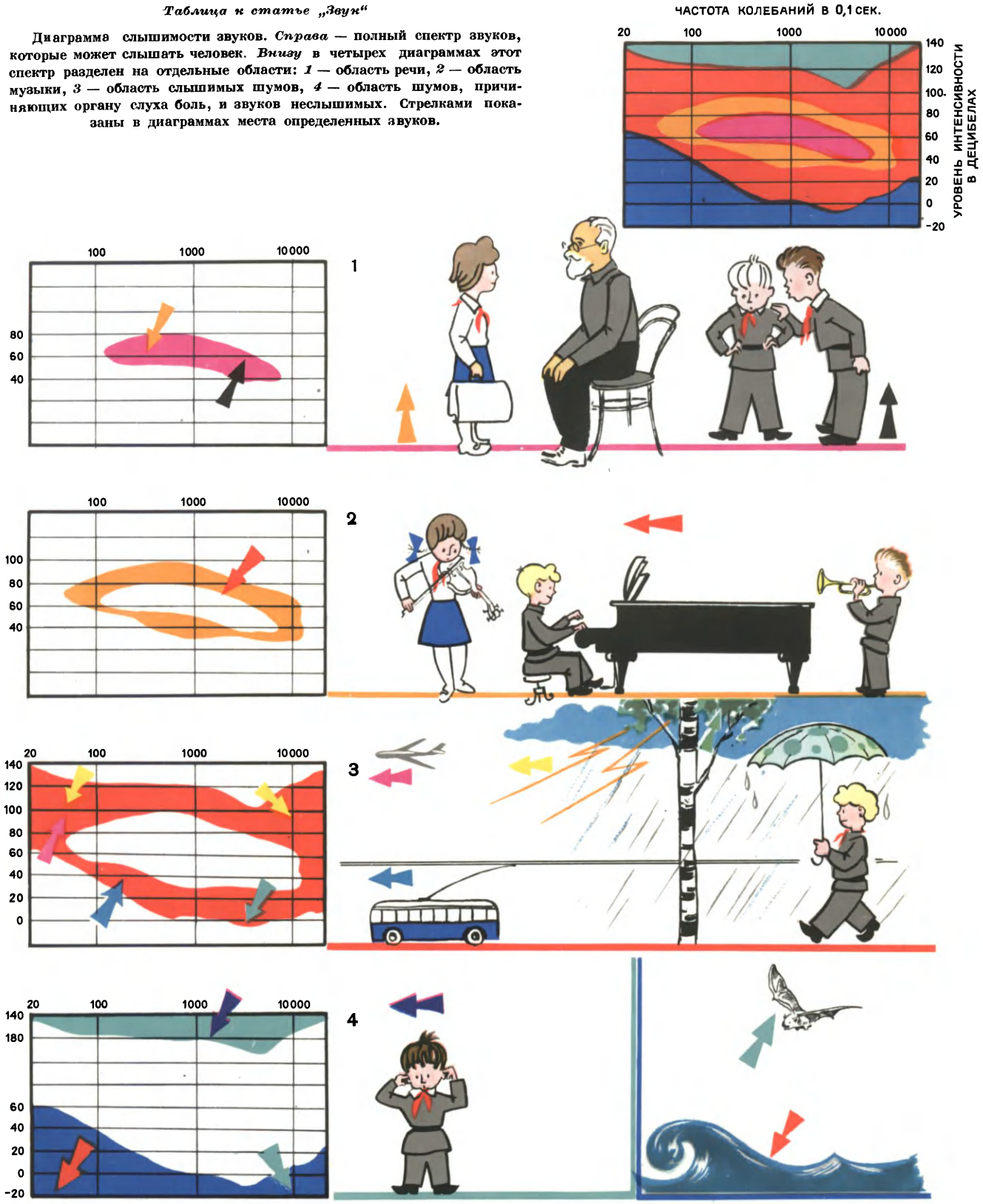
Но мало кому известно, что грозные ударные звуковые волны давно уже несут скромную, мирную и полезную службу — они помогают стеречь колхозные стада. Хороший кнут пастуха устроен очень разумно и целесообразно. Многовековой опыт народа воплотил в нем сложный комплекс законов механики. Секрет хорошего кнута в том, что он постепенно к концу становится все тоньше и тоньше и завершается растрепом — легкой кисточкой.



Умелый сильный взмах кнутовищем, и вдоль по веревке кнута побежит короткая волна — изгиб. Кинетическая энергия будет сохраняться неизменной по всей длине пробега. Но к концу кнут тоньше, масса меньше, энергия волны постоянна, следовательно, скорость будет очень быстро и очень сильно возрастать, достигая сверхзвуковых значений. Возникает мощная ударная звуковая волна — резкий и оглушительный, как выстрел, удар кнута. Ударную звуковую волну нередко можно услышать и в цирке. Укротитель с ее помощью приводит к послушанию даже львов.

*Таблица к статье „Звук“*

**Диаграмма слышимости звуков. *Справа* — полный спектр звуков, которые может слышать человек. *Внизу* в четырех диаграммах этот спектр разделен на отдельные области: *1* — область речи, *2* — область музыки, *3* — область слышимых шумов, *4* — область шумов, причиняющих органу слуха боль, и звуков неслышимых. Стрелками показаны в диаграммах места определенных звуков.**



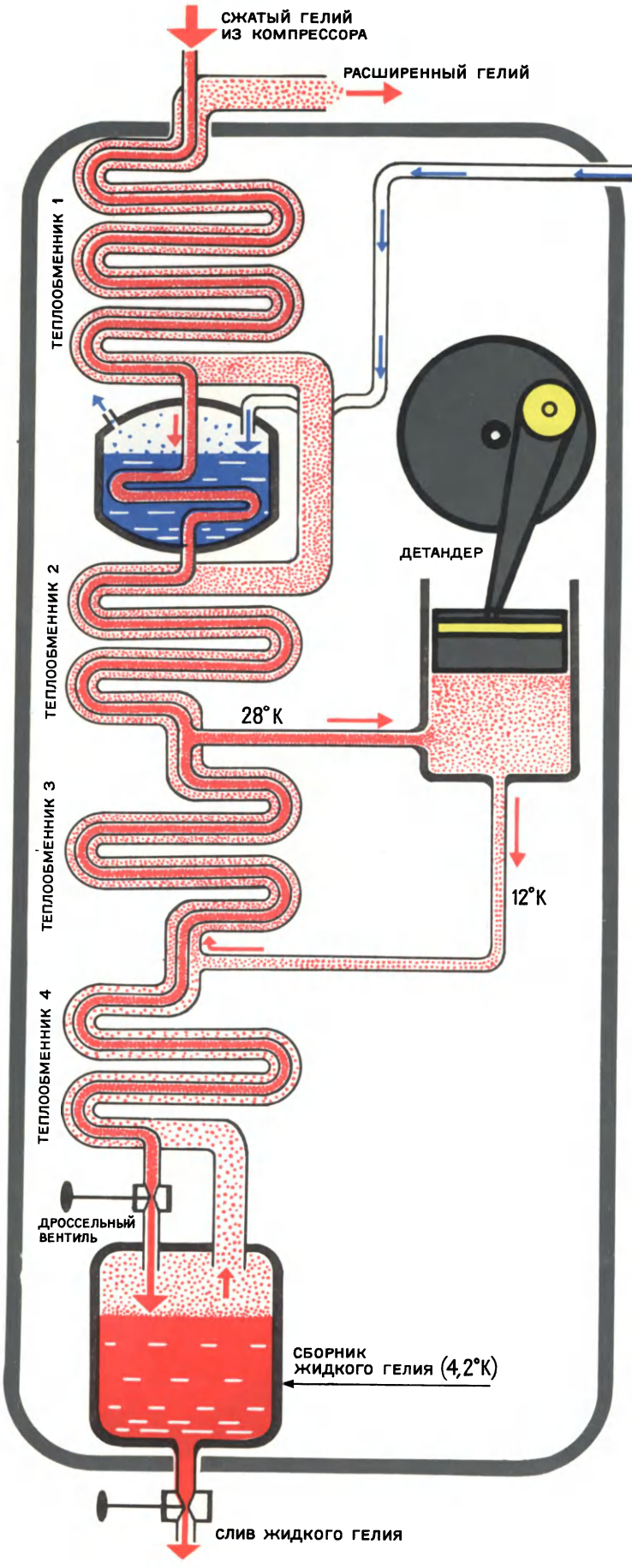
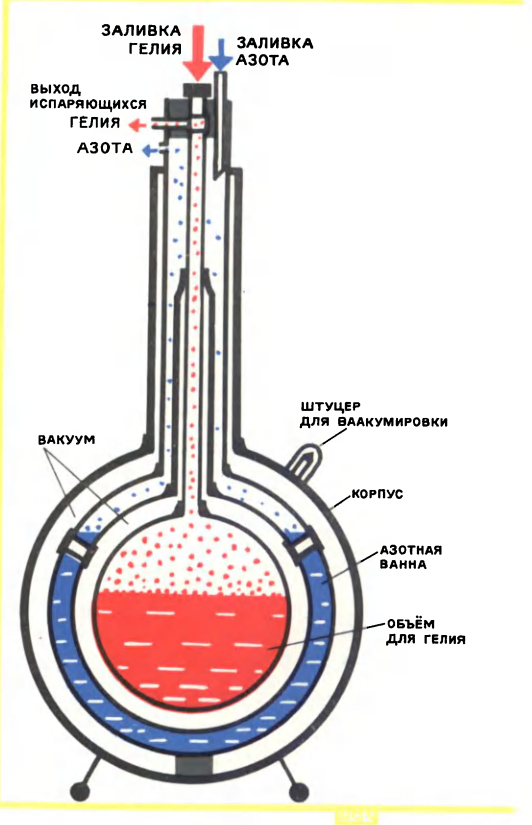



*Таблица к статье „На подступах к абсолютному нулю"*

**Устройство аппарата для ожижения гелия. *Внизу* дюар — сосуд для хранения жидкого гелия.**



Кавитация, возникающая при работе гребного винта, конечно, вредное явление. Но ее можно сделать и полезной. Кавитацию создают искусственно, например пьезоэлектриками. И тогда удается использовать ее при обработке твердых хрупких материалов — стекла, фарфора, драгоценных камней, сверхтвердых сплавов. С ее помощью можно чистить очень загрязненные или заржавленные металлические детали. Очистка происходит мгновенно. Тысячи разрывающихся в жидкости кавитационных пузырьков снимают с металла и ржавчину и грязь.

## УЛЬТРАЗВУК НА СТРОЙКЕ

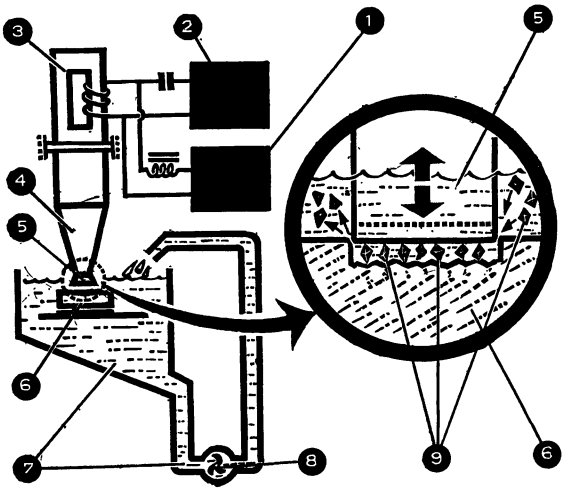
Если бетон при укладке не был достаточно уплотнен, в нем образуются воздушные полости. А такая полость, например, в бетонном теле плотины очень опасна. Качество некоторых бетонных сооружений тщательно проверяется ультразвуковым дефектоскопом. Он своевременно обнаружит и размеры, и глубину залегания воздушных полостей.

На крупном строительстве, например при постройке гидроэлектростанции, укладывают сотни тысяч кубометров бетона. Его качество непрерывно контролируется. И в этом ультразвук незаменим. Бетон приобретает прочность не сразу. При укладке он жидкий, затем «созревает» — твердеет — и превращается в прочный массив. На разных стадиях созревания бетона ультразвук проходит через него с различной скоростью. Специальным аппаратом можно измерить эту скорость и таким образом следить за качеством бетона в процессе строительства.

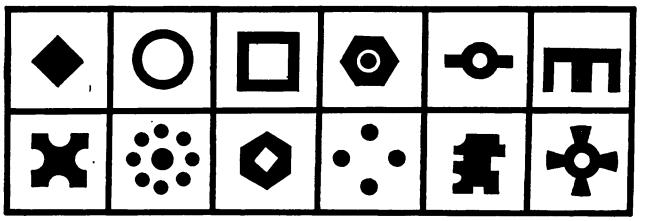
Важную роль играет ультразвук в производстве цемента, асбеста и строительных материалов. Качество этих материалов зависит от размера их зерен. Обычно на цементных заводах применяют механический размол. Но если дробить цемент или асбест ультразвуком с частотой 450 *кгц*, размер частиц уменьшается до 12 *мк*. Такой тонкий размол благоприятно сказывается на качестве сооружений и изделий из цемента и асбеста.

## УЛЬТРАЗВУК РЕЖЕТ МЕТАЛЛ

На обычных металлорежущих станках нельзя просверлить в металлической детали узкое отверстие сложной формы, например в виде пятиконечной звезды. Тут без слесаря не обойдешься, а с помощью ультразвука это можно сделать. **Магнитострикционный вибратор** может просверлить отверстие любой формы. Ультразвуковое долото вполне заменяет фрезерный станок. При этом такое долото намного проще фрезерного станка и обрабатывать им металлические детали дешевле и быстрее, чем фрезерным станком.




**Принцип работы ультразвукового станка;** *1* **— источник постоянного тока;** *2* **— генератор;** *3* **— магнитострикционный сердечник;** *4* **— концентратор;** *5* **— инструмент;** *6* **— обрабатываемая деталь;** *7* **— суспензия;** *8* **— насос;** *9* **— абразив.**



**Некоторые профили инструмента для сквозных отверстий и углублений при ультразвуковой обработке металлических изделий.**

Ультразвуком можно даже делать винтовую нарезку в металлических деталях, в стекле, в рубине, в алмазе. Обычно резьба сначала делается в мягком металле, а потом уже деталь подвергают закалке. На ультразвуковом станке резьбу можно делать в уже закаленном металле и в самых твердых сплавах. То же и со штампами. Обычно штамп закаляют уже после его тщательной отделки. На ультразвуковом станке сложнейшую обработку производит **абразив** (наждак, корундовый порошок) в поле ультразвуковой волны. Беспрерывно

колеблясь в поле ультразвука, частицы твердого порошка «вгрызаются» в обрабатываемый сплав и вырезают отверстие такой же формы, как и у долота.

Большинство ультразвуковых станков работает бесшумно. В недалеком будущем в цехах металлообрабатывающих заводов не будет ни лязга, ни грохота. Путь к тишине идет через звук.

## УЛЬТРАЗВУК В МЕДИЦИНЕ

Ультразвук может резать не только стекло и металлы, но и живую ткань. Обычно при хирургической ампутации руки или ноги врач работает скальпелем и пилой. Но их можно заменить ультразвуковым лучом. Такая операция проходит быстрее, и ткани тела заживляются после нее значительно лучше. С помощью ультразвукового луча можно исследовать расположение внутренних опухолей. В огрубевших от опухолей тканях скорость ультразвуковой волны иная, чем в здоровых. Измеряя скорости прохождения ультразвука через тело, можно очень точно определить границы опухоли. Особенно успешно такие исследования проводятся в коре головного мозга.

Ультразвук обладает способностью разрушать живые ткани. Первыми его жертвами были рыбы, убитые и оглушенные ультразвуком, когда Ланжевен и Вуд испытывали эхолоты в бухте Тулона. Обитающие в воде микробы при облучении их ультразвуком погибают, ультразвуковые колебания их прямо-таки разрывают на части: разрушается оболочка их клетки, да и само внутриклеточное вещество. Поэтому ультразвуком можно обеззараживать воду.

Ультразвук применяют в медицине, чтобы разрушить, например, клетки раковых опухолей или камни в печени. Успешно разрабатывается совершенно безболезненное лечение зубов с помощью ультразвука.

Акустика — не завершенная наука, ведь завершенных наук не существует. В ней много важных и еще не решенных проблем и даже загадочных... О некоторых мы вам рассказали, с другими столкнется тот из вас, кто в будущем выберет себе увлекательную специальность физика-акустика.

■

# НА ПОДСТУПАХ К АБСОЛЮТНОМУ НУЛЮ

## ЧТО ТАКОЕ ХОЛОД?

Состояние и свойства вещества зависят от его температуры. Возьмем, например, воду. При температуре ниже 0°Ц — это твердое тело, при 100°Ц она переходит в газообразное состояние, а при десятках тысяч градусов превращается в плазму.

Температура определяется интенсивностью так называемого теплового движения молекул и атомов. Чем быстрее они двигаются в веществе, тем выше его температура. Когда вещество охлаждается, тепловое движение его частиц затухает. Если же тепловое движение совсем прекратится, дальнейшее понижение температуры станет, очевидно, невозможным. Такую наинизшую температуру называют **абсолютным нулем** и принимают ее за начало отсчета в **абсолютной температурной шкале**, носящей имя английского физика Кельвина.

Абсолютный нуль — 0° К (нуль градусов Кельвина). При отсчете по шкале Кельвина температура таяния льда равна 273,16° К, температура кипения воды (при атмосферном давлении) — 373,16°К (рис. 1). Величиной градусы в шкалах Кельвина и Цельсия равны. Температуру, выраженную в градусах Цельсия, легко перевести в градусы Кельвина: для этого нужно прибавить к ней 273,16°. Например, +27°Ц соответствует 300,16°К.

Повседневный опыт убеждает нас в том, что при контакте двух тел с разной температурой тепло самопроизвольно переходит от более нагретого тела к менее нагретому и температуры обоих тел становятся равными. Передача тепла от менее нагретого тела к телу с более высокой температурой никогда не происходит самопроизвольно. Чтобы осуществить такую передачу, надо затратить энергию — механическую, электрическую, химическую или какую-нибудь другую.

Передачу тепла от холодного тела в окружающую среду, имеющую более высокую температуру, можно рассматривать как получе-

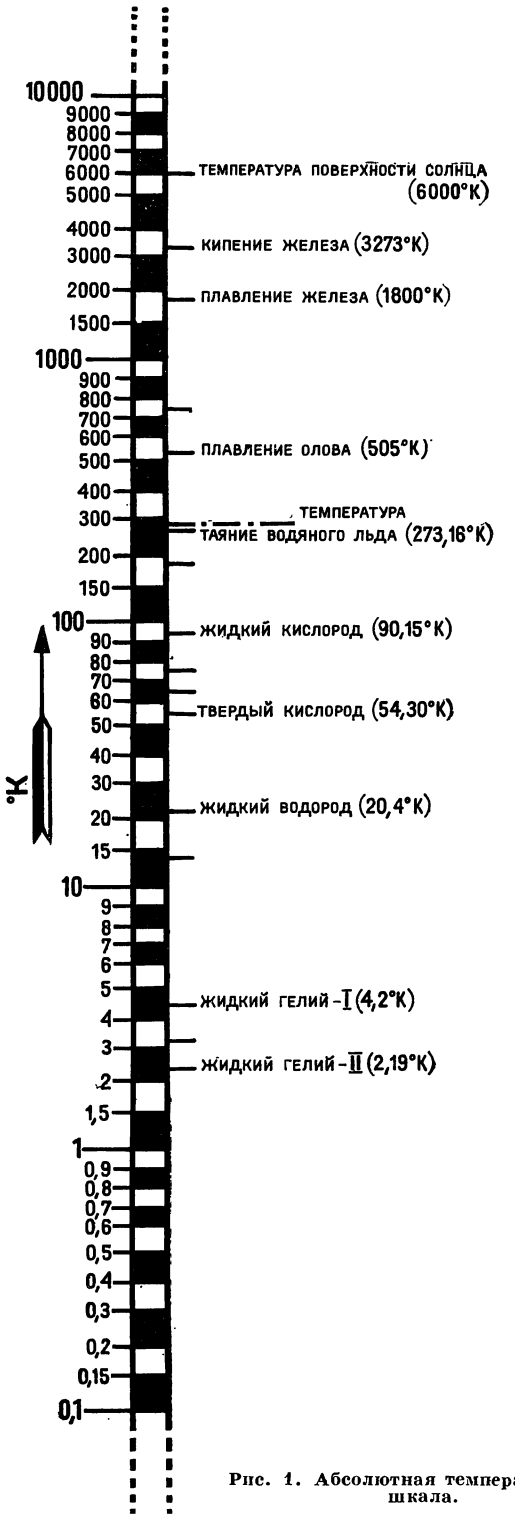



**Рис. 1. Абсолютная температурная шкала.**

ние холода. Тогда под холодом надо подразумевать количество тепла, которое отнимается от охлаждаемого тела. Количество холода не пропорционально затраченной работе: чем ниже температура охлаждаемого тела, тем больше нужно работы, чтобы получить то же количество холода. Особенно сильно возрастает затрата работы на охлаждение вблизи абсолютного нуля. Например, чтобы получить холод на температурном уровне 3°К (—270°Ц), нужно затратить в 1000 раз больше работы, чем для получения того же количества холода при температуре 270°К (—3°Ц). При абсолютном же нуле затрата работы для получения холода должна быть равна бесконечности. Это, кстати, показывает, что охладить тело точно до 0°К вообще невозможно.

Понижение температуры меняет свойства многих тел. Например, мягкая и упругая резина становится при температуре около 200°К жесткой и от удара молотком раскалывается, как стекло. Так же ведут себя многие металлы, например железо, сталь, свинец. Если из свинца сделать колокольчик и охладить его в жидком азоте, он будет издавать мелодичный звон: свинец станет твердым. Но есть металлы и сплавы, в которых понижение температуры увеличивает прочность, оставляя им достаточную пластичность. Таковы, например, медь, ее сплавы и алюминий. Именно из этих металлов изготовляют аппараты, которые используются при низких температурах.

## ГЕЛИЙ ПРЕВРАЩАЕТСЯ В ЖИДКОСТЬ

Для испарения любой жидкости к ней надо подвести тепло (его называют теплотой испарения). Тепло, необходимое для испарения жидкости, кипящей при низкой температуре, напрпмер для жидкого азота, жидкого водорода или жидкого гелия, будет подводиться на низком температурном уровне. Таким образом, тело, от которого будет взято это тепло, охладится до такой низкой температуры.

Испаряя жидкий гелий в вакууме, можно получить температуру всего на 0,7° больше абсолютного нуля. Еще более низкую температуру (до 0,3°К) дает сжиженный изотоп гелия $He^3$.

Чтобы охладить какой-либо предмет до нужной температуры, достаточно поместить его в ванну с соответствующим сжиженным газом.

Таким образом, основная задача при получении очень низких температур — это сжижение газов. Его можно добиться двумя методами.

Первый метод — **дросселирование**, т. е. расширение сжатого газа в вентиле. При таком расширении молекулы газа преодолевают силу взаимного притяжения, их тепловое движение замедляется и газ охлаждается.

Этот метод применяется в простейших установках для ожижения газов. Газ сжимают компрессором, охлаждают в теплообменнике и расширяют в дроссельном вентиле. При таком расширении часть газа ожижается. У каждого газа есть определенная температурная точка — так называемая **инверсионная температура**. При дросселировании газа, находящегося выше инверсионной температуры, он уже не охлаждается, а нагревается. Для большинства газов инверсионная температура выше комнатной, но у водорода она равна 193°К (—80°Ц), а у гелия даже 33°К (—240°Ц). Поэтому применять метод дросселирования можно, только предварительно охладив газ ниже его инверсионной температуры.

При другом способе получения холода сжатый газ заставляют не только расширяться, но и совершать механическую работу в цилиндре с поршнем или в турбине. Молекулы газа, ударяясь о поршень или о лопатки турбины, передают им свою энергию; скорость молекул сильно снижается, и газ интенсивно охлаждается.

Расширительные машины, применяемые при этом способе, называются **детандерами**. Они могут быть поршневого или турбинного типа. На цветной таблице у страницы 113 показано, как устроен аппарат для ожижения гелия с поршневым детандером. В аппарат из компрессора поступает гелий, сжатый при комнатной температуре давлением около 20 *атм*. Сжатый гелий предварительно охлаждается в теплообменнике и в ванне с жидким азотом. Бóльшая часть сжатого гелия расширяется в поршневом детандере, а гелий, оставшийся сжатым, охлаждается холодным газом до 11—12°К и после теплообменника расширяется в дроссельном вентиле. При этом часть газа превращается в жидкость и скапливается в сборнике. Гелий, оставшийся в газообразном состоянии, подается в теплообменник для охлаждения следующих порций газа, нагревается до комнатной температуры и вновь сжимается компрессором. При этом сжижается примерно 10% подаваемого в аппарат гелия. Для теплоизоляции от окружающей среды все холодные узлы аппарата помещены в герметичный кожух — своеобразный термос, в котором поддерживается высокий вакуум.

Жидкий гелий представляет собой бесцветную легкую жидкость, плотность которой в 8 раз меньше, чем у воды. Он кипит под атмосферным давлением при температуре около 4°К. Жидкий гелий используют обычно для охлаждения исследуемых веществ до температуры, близкой к абсолютному нулю.

Водород, азот и другие газы сжижают теми же методами, но соответственно при более высокой температуре.

## КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Исследование низких температур привело к открытию двух удивительных явлений — **сверхпроводимости** и **сверхтекучести**. Оба эти явления весьма отличаются от свойств, которыми обладают вещества при обычных температурах, и могут быть объяснены только с помощью квантовой механики.

Один из основных законов квантовой механики — это представление о **дискретном**, т. е. прерывистом, характере физических процессов в природе. В частности, это значит, что энергия любого вида, в том числе и тепловая, может передаваться лишь определенными, очень малыми порциями — квантами. Только квантовая механика может объяснить некоторые явления в микромире: свойства молекул и атомов, движение электронов, устойчивость ядер.

Законам квантовой механики должны подчиняться и многие явления в веществах — в газах, жидкостях и твердых телах. При обычных температурах из-за интенсивного теплового движения частиц квантовые свойства вещества не могут быть обнаружены. С понижением температуры интенсивность теплового движения частиц и их энергия уменьшаются и квантовые свойства вещества начинают отчетливо проявляться.

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

Способность твердого тела проводить электричество обусловлена свободными электронами, которые перемещаются между атомами кристаллической решетки. Такие электроны можно для наглядности представить как некую «жидкость», протекающую сквозь решетку кристалла. Под действием электрического поля эта «электронная жидкость» течет через про-

водник в виде электрического тока. Но между «жидкостью» и кристаллической решеткой происходит трение — электрическое сопротивление металла.

Величина сопротивления во многом зависит от состояния кристаллической решетки. При высокой температуре геометрическая правильность решетки существенно нарушается тепловым движением атомов. С понижением температуры эта правильность восстанавливается. Чем ниже температура, тем меньше и сопротивление.

В 1911 г. голландский физик Камерлинг-Оннес открыл удивительное явление: при температуре 4,12°К в ртути внезапно исчезает электрическое сопротивление (рис. 2). Вначале предполагали, что какое-то сопротивление в ртути все же остается и его просто не могут измерить. Но и самые чувствительные приборы не обнаружили сопротивления. Это

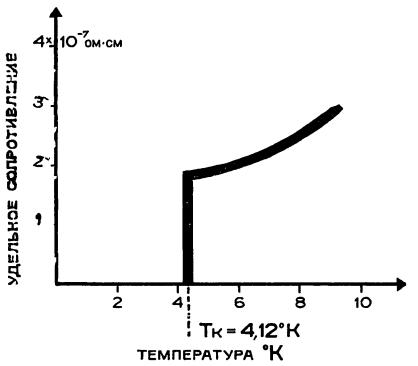



**Рис. 2. Электрическое сопротивление ртути при низких температурах. При температуре 4,12° К сопротивление резко падает до нуля.**

физическое явление назвали сверхпроводимостью.

Сверхпроводимость прекрасно иллюстрируется таким опытом. Кольцо из какого-либо сверхпроводящего металла охлаждается жидким гелием. В кольце одним импульсом магнитного поля наводится электрический ток, и этот ток не исчезает до тех пор, пока удается поддерживать в металле низкую температуру.

Существование незатухающих токов подтверждают и другие поразительные эксперименты. Опишем один из них. На кольцо, в котором течет незатухающий ток, опускается сверхпроводящий шарик. Магнитное поле кольца индуцирует ток того же направления на поверхности шарика. Так как сопротивление у шарика также равно нулю, индуцированный ток в нем не затухает. Магнитные поля токов кольца и

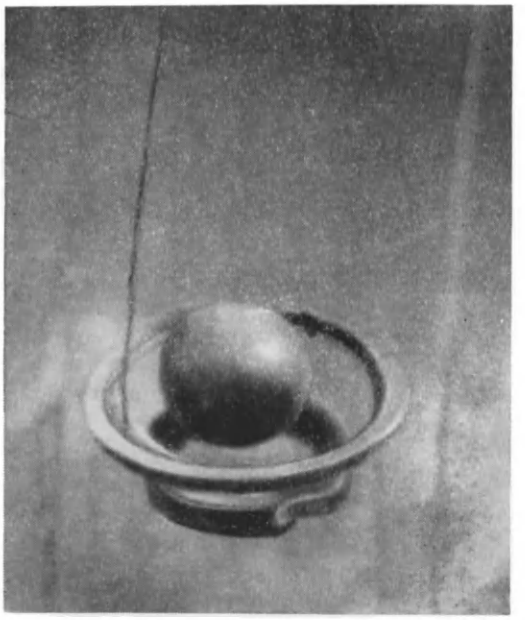


**Рис. 3. Плавающий сверхпроводящий шарик над сверхпроводящим кольцом с незатухающим током (из книги Мендельсона «Физика низких температур»).**

шарика взаимно отталкивают их друг от друга. И вот шарик плавает над кольцом: отталкивающая сила преодолевает его вес (рис. 3).

Таким образом, при так называемой **критической температуре** некоторые металлы скачкообразно переходят в состояние сверхпроводимости, при котором полностью отсутствует электрическое сопротивление. В дальнейшем было открыто, что сверхпроводимостью обладает не только ртуть, но и другие металлы, например олово, свинец, цинк, алюминий. Всего до сих пор открыто 23 элемента со свойствами сверхпроводников.

В последние годы ученые обнаружили, что сверхпроводимость возникает и в некоторых сплавах, составные части которых сами по себе таким свойством не обладают даже при самых низких температурах. Таковы, например, сплавы висмута с натрием, с калием. Сверхпроводимость обнаружена более чем у 35 двойных сплавов и примерно у 70 более сложных соединений металлов. Критические температуры перехода в сверхпроводящее состояние образуют интервал более чем в полтора десятка градусов: 18°К — для химического соединения ниобий—олово и 0,165°К — для гафния.

Сверхпроводящие металлы при температуре ниже критической становятся идеальными диа-

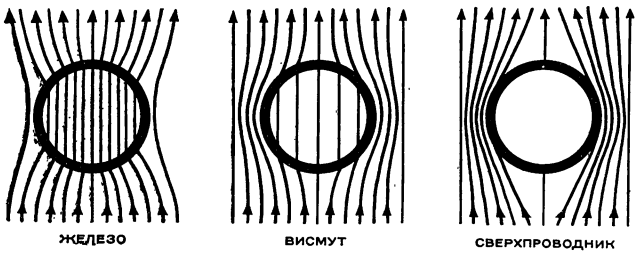



**Рис. 4. Проникновение магнитного поля в шары из различных материалов.**

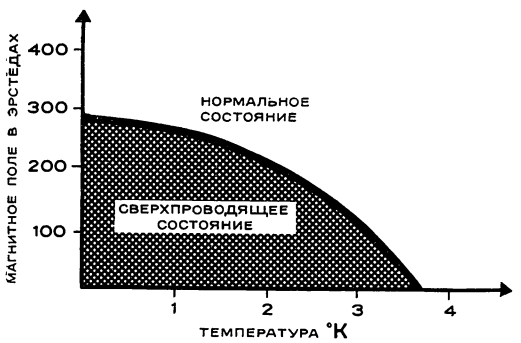



**Рис. 5. Диаграмма сверхпроводящего перехода олова.**

магнетиками. Известно, что различные металлы, находясь в магнитном поле, в той или иной степени пропускают через себя магнитные силовые линии. Ферромагнетики, например железо, втягивают в себя эти линии и сгущают их. В диамагнетике, например в висмуте, магнитные силовые линии, наоборот, несколько разрежены. Сверхпроводники же полностью выталкивают из себя магнитные силовые линии (рис. 4).

Если сверхпроводник поместить в магнитном поле, сверхпроводимость нарушается. Чем ниже температура, окружающая сверхпроводник, тем большая сила магнитного поля нужна, чтобы разрушить сверхпроводимость. На рисунке 5 показана зависимость критической температуры свинца от напряженности магнитного поля.

В последнее время сверхпроводимость начали применять в технике. После того как были найдены сверхпроводники с высокой температурой перехода (примерно 18°К), стало возможным изготовлять так называемые **сверхпроводящие соленоиды**. Такой соленоид устроен как и обычный, только обмотка его изготовлена из сверхпроводящей проволоки, например из сплавов ниобий—олово или ниобий—цирконий. Вся обмотка помещается в сосуд с жидким гелием. В этих условиях электрическое сопротивление обмотки равно нулю, и таким образом поддерживается магнитное поле без затраты энергии, которая при других способах нужна, чтобы преодолеть электрическое сопротивление обмотки. Хотя получение жидкого гелия для такого соленоида и требует затраты энергии, эта затрата в сотни раз меньше, чем потребность в энергии обычного соленоида, создающего такое же магнитное поле. Теперь построены сверхпроводящие соленоиды, создающие поле свыше 100 000 эрстед. Сверхпроводящие соленоиды и вообще электротехнические сверхпроводящие материалы и устройства (например, электромагниты, электродвигатели) имеют огромное будущее.

Сверхпроводники применяются также, например, в маломощных переключающих устройствах, особенно в устройствах, предназначенных для вычислительных машин. В простейшем виде элемент такого устройства — **криотрон** — состоит из свинцовой проволоки, на которую намотана однослойная катушка из ниобиевой проволоки (рис. 6 и 7). Когда магнитное поле в сверхпроводящем соленоиде

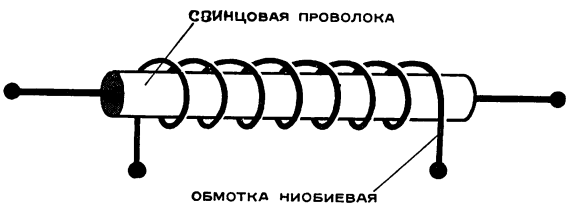



**Рис. 6. Схематическое устройство криотрона, который может использоваться как переключающее устройство.**

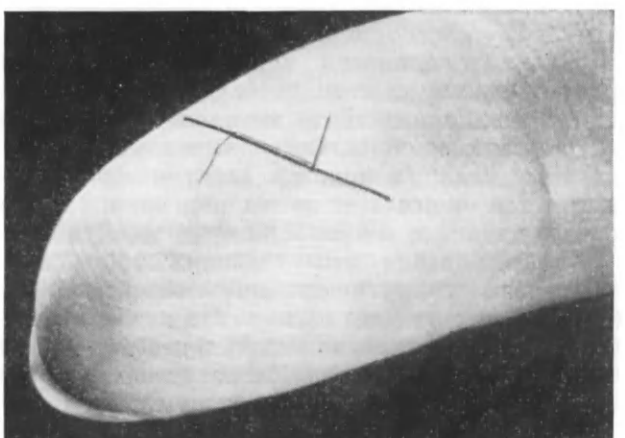


**Рис. 7. У криотрона простого типа исключительно малые размеры.**

из ниобиевой проволоки превысит критическую для свинца величину, сверхпроводящий ток в свинцовой проволоке прерывается, и это соответствует размыканию цепи.

Криотрон можно использовать как реле в электронно-счетной машине. В узлах электронно-счетной машины, состоящих из криотронов, достигнута скорость переключений около 20 млн. в секунду. В криотроне можно создать незатухающий ток, и тогда он становится запоминающим устройством для хранения информации. Такие устройства позволяют образовывать большие запасы легко и быстро «читаемой» информации. Каждый отдельный элемент прост и дешев. Затрата энергии на работу машины с криотронами так мала, что ею можно пренебречь. Все эти преимущества криотронов оправдывают применение дорогостоящих низких температур.

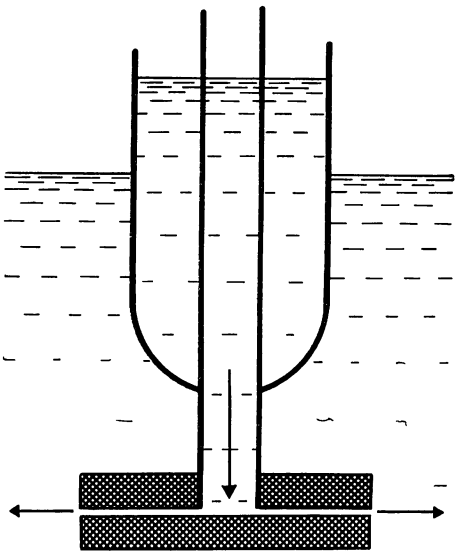


Рис. 8. Опыт Капицы для обнаружения сверхтекучести гелия. Сверхтекучий гелий быстро вытекает из внутренней трубки через узкую щель между двумя пластинками. Внешний сосуд, также заполненный гелием, обеспечивал одинаковую температуру гелия снаружи и внутри трубки.

## СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ

Гелий обладает удивительным свойством: из всех существующих в мире веществ он сжижается при самой низкой температуре: 4,2°К (—269°Ц). Но у гелия есть и другие удивительные свойства. При дальнейшем охлаждении он остается жидким. Все остальные вещества при охлаждении в конце концов затвердевают.

В 1937 г. в Московском институте физических проблем советский ученый П. Л. Капица обнаружил, что при температуре ниже 2,2°К жидкий гелий обладает новым свойством: он приобретает способность протекать без какого-либо трения. Это свойство было названо сверхтекучестью, а гелий при температуре ниже 2,2°К — **гелием-II**.

В опыте Капицы гелий-II протекал за несколько секунд между плотно сжатыми шлифованными стеклянными пластинами через щель шириной всего в 0,5 *мк* (рис. 8). При температуре выше 2,2°К жидкий гелий лишь с трудом просачивается через такую щель. Это показывает, что вязкость у сверхтекучего гелия в миллиарды раз меньше, чем у воды. По современным представлениям считается, что вязкость его равна нулю.

Сверхтекучий гелий образует так называемую «ползущую» пленку толщиной около $10^{-6}$ *см* (рис. 9). Такой пленкой он может подниматься вверх по вертикальной стенке сосуда и вытекать из него. Любая жидкость, смачивающая твердую поверхность, образует пленку, но быстро перетекать по этой пленке не может никакая другая жидкость, кроме гелия-II, и это свойство обусловлено его сверхтекучестью.

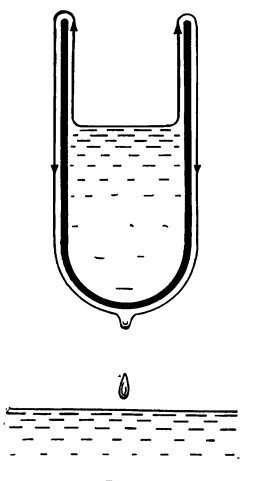


Рис. 9. Жидкий сверхтекучий гелий образует на поверхности стекла пленку толщиной в несколько миллионных долей сантиметра. Эта пленка представляет собой подобие сифона, по которому жидкость вытекает из гелиевого резервуара.

Удивительные свойства жидкого гелия теоретически объяснил советский ученый Л. Д. Ландау. Упрощенно это объяснение сводится к следующему: в гелии-II так мало квантов тепла, что на все его частицы их не хватает, и образуются как бы две жидкости, одновременно существующие: нормальный гелий, каждая частица которого несет на себе квант тепла, и сверхтекучий гелий, на частицах которого нет квантов тепла. Сверхтекучая часть гелия как бы находится при абсолютном нуле температуры; она не обладает вязкостью, и поэтому обе жидкости могут двигаться друг в друге без трения.

В опыте Капицы сверхтекучая часть гелия-II быстро перетекала через щель, а несверхтекучая часть лишь медленно просачивалась через

ту же щель. При этом сверхтекучая часть как бы отфильтровывалась. Опытом доказано, что за щелью у гелия-II более низкая температура, чем до щели. С понижением температуры ниже 2,2°К доля сверхтекучей части в гелии-II увеличивается; при абсолютном нуле весь гелий должен превратиться в сверхтекучий.

## НАИНИЗШАЯ ТЕМПЕРАТУРА

Молекулы некоторых парамагнитных солей, например хромокалиевых квасцов, могут поворачиваться, как маленькие магнитики, вдоль силовых линий магнитного поля. Если такую соль, предварительно охлажденную с помощью жидкого гелия до 1°К, поместить в сильное магнитное поле, то все ее молекулы повернутся вдоль силовых линий этого поля, а выделенное тепло будет передано жидкому гелию. Если затем резко снять магнитное поле, то молекулы соли вновь повернутся в разные направления, а затраченная на это работа приведет к дальнейшему охлаждению соли.

Так может быть получена температура до 0,001°К. Этот способ охлаждения называется **методом адиабатического размагничивания.**

Таким же в принципе методом, только с применением других веществ можно получить еще более низкую температуру. Этот способ называется **ядерным размагничиванием**. Наинизшая температура, полученная пока что на Земле, равна **0,00001°К.**

■

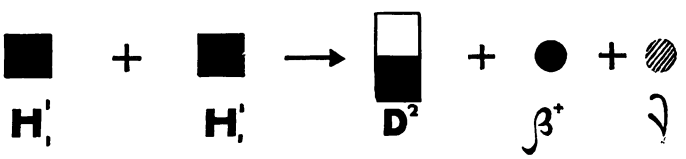
# СТО МИЛЛИОНОВ ГРАДУСОВ

Холодно или жарко в нашем мире? На первый взгляд материя Вселенной не так уж горяча. Дышим мы прохладным воздухом, пьем холодную воду, катаемся по льду, лепим снежки. Нас не греет черное ночное небо. Чтобы согреться, приходится зажигать костры и топить печи. Между тем подавляющая масса вещества в мире испепеляюще горяча.

Те десятки градусов в ту или другую сторону от точки таяния льда (0°Ц), в которых мы живем и к которым привыкли,—редкое исключение, крошечный уголок природы. Типичная же, наиболее распространенная температура вещества — это, как ни странно, миллионы, десятки миллионов, даже сотни миллионов градусов. До таких грандиозных температур нагреты звезды. Астрономы доказали, что именно в них сосредоточена львиная доля вещества нашего мира. Вот красноречивый пример. Солнце — ближайшая к нам звезда — раскалено в недрах до 10—13 млн. градусов. А вещества в Солнце в тысячи раз больше, чем во всех планетах солнечной системы.

Что же происходит в жарких глубинах звезд? Какие процессы поддерживают там огромную температуру? Современная наука доказала: там, под ослепительным наружным покровом, непрерывно идут превращения атомных ядер, и это сопровождается колоссальным выделением энергии.

В раскаленном веществе Солнца очень много водорода. Но не обычного газа, а водородной п л а з м ы: она состоит не из целых атомов, а из атомных осколков — ядер и электронов. При колоссальной температуре солнечных глубин частицы водородной плазмы испытывают весьма быстрое и энергичное беспорядочное движение. Ядра при этом с разгона налетают друг на друга. Иногда столкновение бывает таким сильным, что ядра преодолевают взаимное электрическое отталкивание (они ведь все заряжены положительно), тесно сближаются и сливаются воедино. Тогда из двух ядер обычного («легкого») водорода, т. е. из двух п р о т о н о в, получается ядро тяжелого водорода — д е й т р о н. Вместе с тем вылетают прочь отходы реакции—электрон и нейтрино. А главное, освобождается весьма значительная энергия.




Слияние двух протонов — маленький взрыв. Но он сопровождается не разрушением, а созиданием — созиданием нового ядра, более слож-

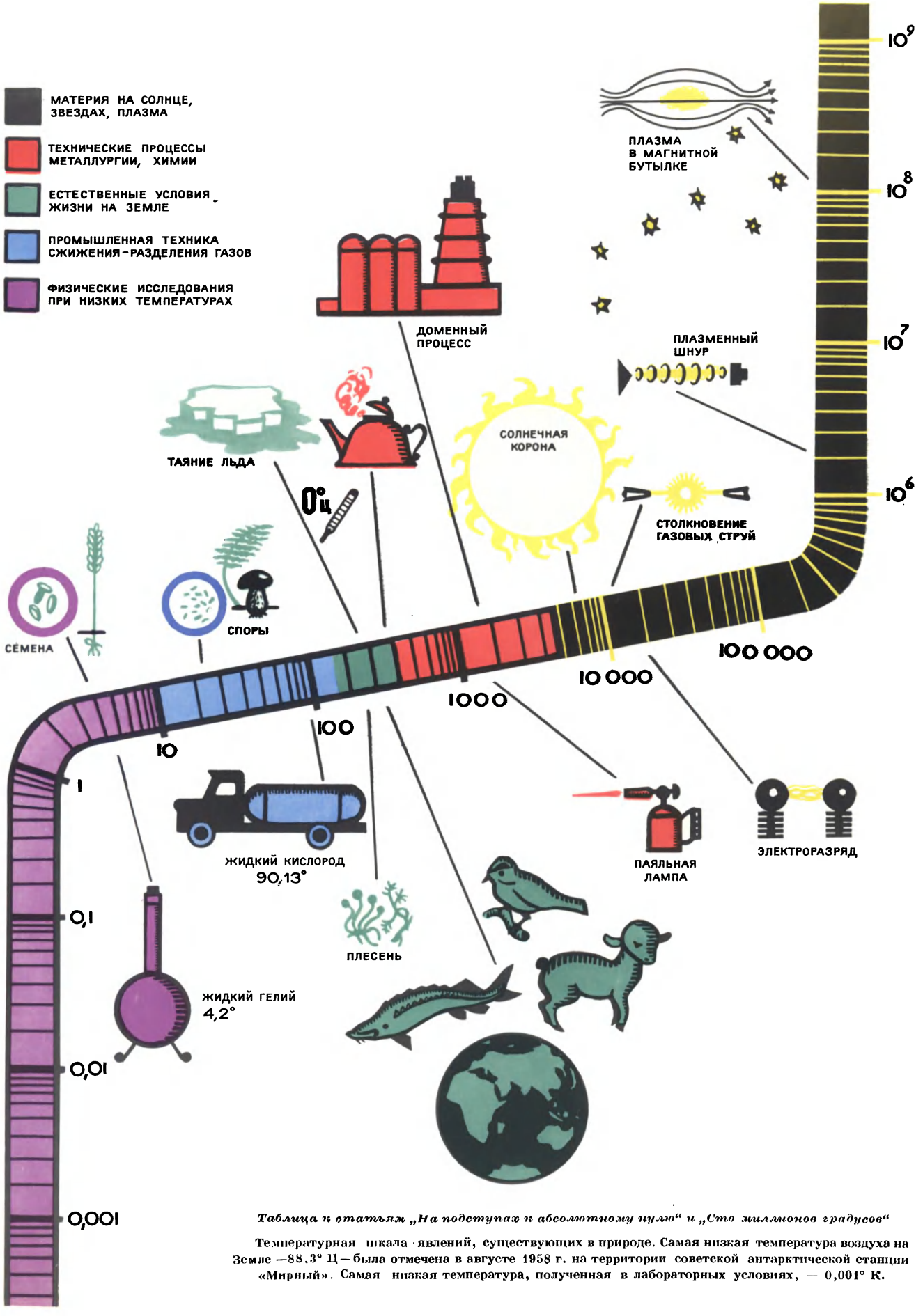
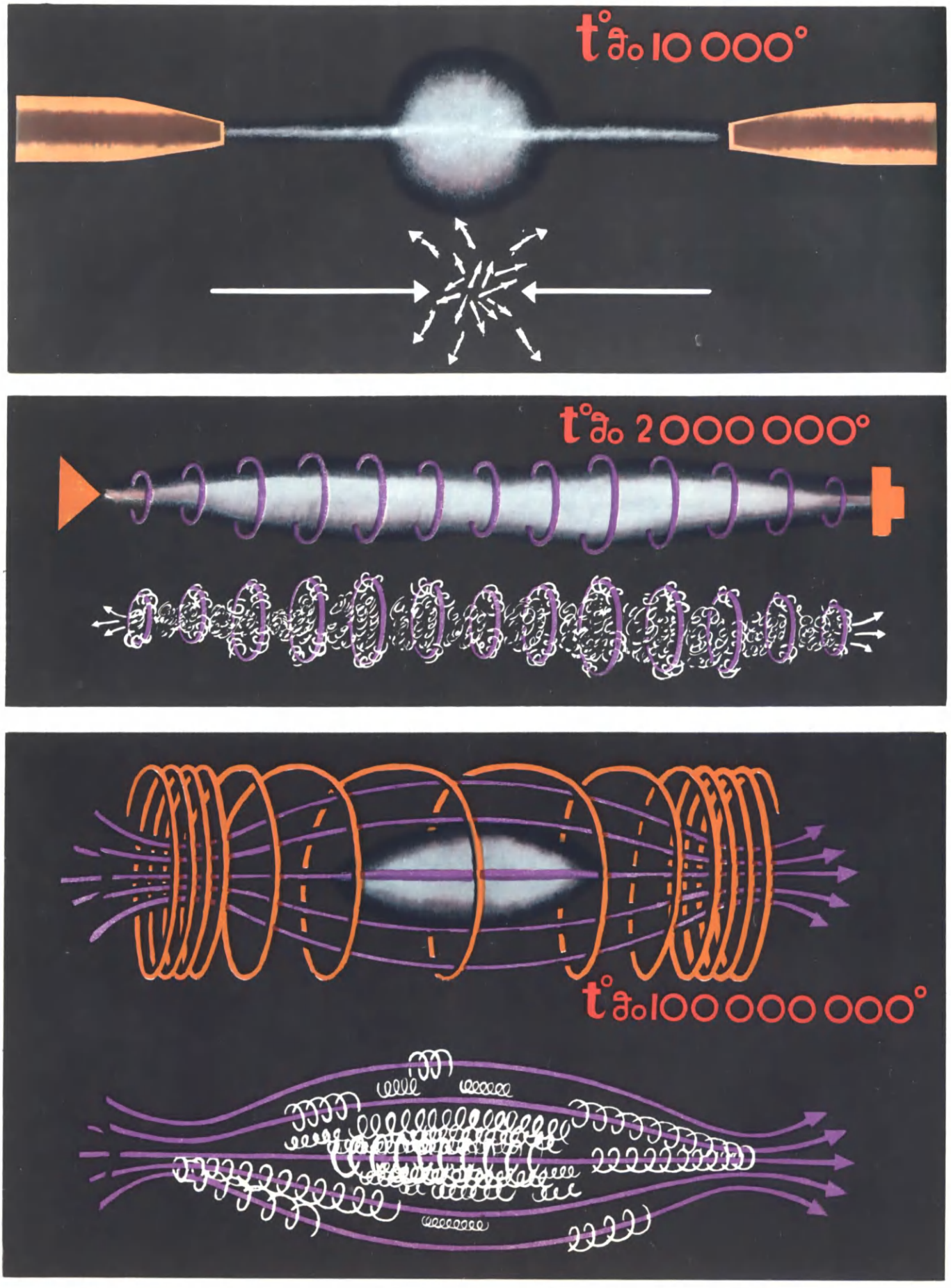



*Таблица к статьям „На подступах к абсолютному нулю“ и „Сто миллионов градусов“*

Температурная шкала явлений, существующих в природе. Самая низкая температура воздуха на Земле —88,3° Ц — была отмечена в августе 1958 г. на территории советской антарктической станции «Мирный». Самая низкая температура, полученная в лабораторных условиях, — 0,001° К.


t° ส. 10 000°
t° ส. 2 000 000°
t° ส. 100 000 000°

ного и тяжелого, чем исходные. Этот взрыв — одно из самых сокровенных таинств природы.

Вот что удивительно. Если бы мы попробовали истолковать синтез дейтрона из протонов, руководствуясь только классической физикой, то пришли бы к выводу, что такой синтез невозможен: слишком сильно протоны отталкиваются друг от друга. Тем не менее на Солнце эти протоны сливаются, а значит, пробивают-таки «непробиваемую» стену электрического отталкивания.

Лишь квантовая механика (см. последнюю главу ст. «Электромагнитное поле») — наука о микрочастицах и микропроцессах — объяснила, почему это происходит. Квантовая механика выяснила очень характерную для микромира закономерность: многое из того, что в классической физике строго-настрого запрещено, в квантовой механике лишь почти запрещено, т. е. не невозможно, а только очень маловероятно.

Сколько бы ни билась муха об оконное стекло, она никогда не проникнет сквозь него — так утверждает классическая физика, и утверждает совершенно верно, ибо речь идет о событии в мире больших тел, в макромире.

*Таблица к статье «Сто миллионов градусов»*

***В верхней части*** **схематически изображено столкновение газовых струй. Упорядоченное движение газовых молекул после столкновения становится хаотичным, и температура вещества в месте встречи поднимается до 10 000°.** ***В средней части*** **изображена схема возникновения высокой температуры в плазменном шнуре. Вокруг шнура, как вокруг любого электрического тока, возникает магнитное поле — его силовые линии изображены в виде красных колечек. Ток растет, поле тоже растет, а следовательно, силовые линии поля — колечки — сжимаются. Но вокруг силовых линий вьются заряженные частицы плазмы. И когда колечки стягиваются, они увлекают заряженные частицы плазмы к оси шнура. Там, у оси, образуется хаос крутящихся и бурлящих частиц плазмы. Температура у оси шнура поднимается до 2 000 000°.** ***Внизу*** **— схема действия открытой магнитной ловушки. Витки, создающие магнитное поле, у краев катушки наложены гуще, чем в центре. Поэтому и магнитное поле, возникающее в катушке, когда по виткам проходит ток, получается неоднородным — у краев оно сильнее, чем в центре. Края магнитной ловушки называют «пробками» или «зеркалами». Когда внутрь ловушки вспрыснута плазма, ее электрически заряженные частицы вьются вокруг силовых линий поля. Подлетая в спиральном движении к «пробкам», частицы не могут «пролезть» сквозь них: чтобы «пролезть», нужно уменьшить радиус спирали, а для этого требуется дополнительная энергия, которую частице неоткуда взять. Таким образом, частицы «отражаются» от «пробок» и поворачивают обратно. Внутри ловушки возникает встречное движение кружащихся по спиралям плазменных частиц. Они сталкиваются, движение их становится беспорядочным. При соблюдении ряда дополнительных условий этим способом удается поднять температуру плазмы (правда, довольно разряженной) до 40—50 миллионов градусов и сохранять ее в таком состоянии в течение сотых долей секунды.**

Иначе будет в микромире. Допустим, что муха — это протон, а стекло — непробиваемый барьер электрического поля. В редчайших случаях, с какой-нибудь стомиллиардной «попытки», эта муха — протон — очутится вдруг по ту сторону стекла. И, что примечательно, стекло при этом не будет разбито, в нем не будет проткнуто никакой дырочки. Просто с ничтожной вероятностью происходит почти невероятное событие.

Сущность этого явления — глубочайшая физико-философская проблема, поныне еще не решенная до конца. Ученые сходятся на том, что секрет парадокса скрыт в специфике микрочастиц: это вовсе не предметы, подобные, скажем, бильярдным шарикам, это скорее волновые вероятностные процессы, некий вид взаимодействия на самых нижних этажах всеобъемлющего здания материи.

Итак, совершается невероятное. Где-то в недрах Солнца соединяются протоны. О редчайшей случайности такого синтеза можно судить по тому, что даже при температуре и плотности глубин Солнца протон должен проблуждать **в среднем** 14 млрд. лет, непрерывно сближаясь с другими протонами, пока не произойдет это долгожданное событие — образование дейтрона. Но протонов в глубинах Солнца бесчисленно много, и поэтому все время то тут, то там происходят «чудеса»: в крошечных микровзрывах рождается тяжелый водород. И все новые порции энергии освобождаются, вливаясь в звездный жар светила.

Но почему же при синтезе дейтронов выделяется энергия? Казалось бы, наоборот, энергия должна поглощаться: из простого строится сложное, на сближение двух упрямо отталкивающихся протонов затрачивается работа.

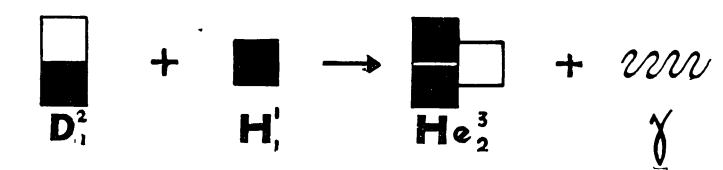
Да, работа затрачивается, и немалая. Пока протоны сблизятся друг с другом, они полностью затормозятся. Но если к этому моменту они окажутся друг от друга на расстоянии около $10^{-13}$ *см*, вступят в действие могучие силы ядерного притяжения. Протоны как бы «падают» друг на друга, словно бы хватают друг друга в мощные «объятия», и в этом-то «падении», в этих «объятиях» и выделяется энергия, так же как, скажем, при падении метеорита на Землю. Разница в том, что, хотя ядерные силы действуют на очень малом расстоянии, они в миллиарды миллиардов раз больше сил тяготения, поэтому и энергия синтеза колоссальна. Она с лихвой окупает работу, затраченную протонами на преодоление электрического отталкивания, и, вырываясь наружу,

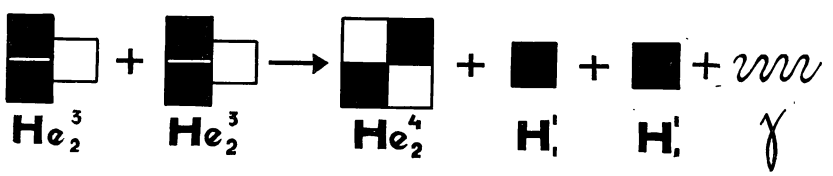
вливается в величайшее тепловое богатство Солнца.

Одним из фундаментов физики стал сейчас эйнштейновский принцип эквивалентности массы и энергии: масса любого тела, дважды помноженная на скорость света, соответствует энергии этого тела: $E=mc^2$, где $E$ — энергия, $m$ — масса, $c$ — скорость света. Поэтому изменение массы тела или системы тел должно сопровождаться либо выделением, либо поглощением энергии. Зная это, нетрудно подсчитать, сколько энергии дает синтез дейтрона из протонов.

Масса протона равна 1,007825, значит, два протона имеют массу 2,01565, но масса дейтрона равна 2,01410, т. е. меньше массы двух протонов на 0,00155 (физики эту разность называют **дефектом массы**). По принципу эквивалентности она соответствует энергии в 0,46 млн. электрон-вольт (электрон-вольт — энергия, которую приобретает электрон, когда он преодолевает разность потенциалов в один вольт). Вот это количество энергии и выделяется при образовании дейтрона.

Слияние протонов — только начало цепочки ядерных реакций, происходящих в Солнце.




Каждый возникший дейтрон очень скоро (в среднем через 5,7 *сек*) присоединяет к себе еще один протон, превращаясь в ядро легкого гелия и выделяя энергию 5,5 *Мэв*. Затем, в среднем через миллион лет, ядра легкого гелия сливаются попарно — тут образуется конечный продукт, ядро обычного гелия. При этом выбрасываются два протона, а энергия выделяется очень значительная — 12,89 *Мэв*.

Так, через несколько ядерных превращений водородные ядра преобразуются в ядра гелия — газа, который ученые сначала обнаружили на Солнце и только потом на Земле. В этой статье указан только главный цикл ядерных превращений; есть и другой, в котором участвуют ядра углерода, кислорода, азота (см. последнюю главу статьи «Великий закон»). И энергия, освобождающаяся во всех этих превращениях, титанически огромна. Ежесекундно миллионы тонн вещества превращает Солнце в лучистые потоки. Но водород настолько концентрированное ядерное горючее, что за миллион лет Солнце теряет всего лишь миллионную долю своей массы!

Подобные ядерные процессы могут происходить лишь при очень высокой температуре, и названы они т е р м о я д е р н ы м и. Чем выше температура, тем сложнее и тяжелее синтезирующиеся ядра, тем больше выделяется энергии. И именно благодаря термоядерным реакциям так сильно нагрето звездное вещество, пылающее в вечном, неутихающем пожаре.

Поняв жизнь Солнца, разгадав энергетические источники звезд, ученые наметили себе цель: зажечь такой же могучий звездный огонь и на Земле! Воссоздать в земной промышленной установке управляемый, послушный человеческой воле термоядерный процесс. Добиться этого — значит получить практически неиссякаемый источник энергии. Ведь водородом наша планета очень богата (этот элемент входит в состав воды). Даже если научиться сжигать в термоядерных реакторах менее распространенный в природе тяжелый водород (на Солнце тяжелый водород воспламеняется особенно легко), то и тогда каждая кружка обычной воды станет равноценна бочке бензина! Наконец, есть еще одно замечательное термоядерное горючее — так называемый сверхтяжелый водород. В природе его, правда, почти нет, но его можно получать методами современной «алхимии» — в ядерных реакторах из легкого изотопа лития ($Li^6$), которого немало в земной коре. Смесь тяжелого водорода и сверхтяжелого будет, видимо, наиболее подходящим горючим в термоядерной энергетике будущего.

Как же решается эта великая проблема? Сейчас главная задача ученых — устроить «звездную спичку», нагреть вещество до таких сверхвысоких температур, при которых начнется энергетически выгодная термоядерная реакция.

Как рассчитали физики, в земных условиях для этого потребуется куда более высокая температура, чем в недрах Солнца. Причем термоядерное горючее надо «поджечь» без взрыва, иначе процесс выйдет из-под контроля. (Неконтролируемый, неуправляемый ядерный синтез уже осуществлен в водородной бомбе, где соединения изотопов водорода воспламеняются самым грубым способом — взрывом атомной бомбы.)

Проще всего нагреть тело, передав ему тепло от другого тела, нагретого сильнее. Например, вода в чайнике закипает, черпая тепло от более горячего — огня. Специфика нашей задачи заключается в том, что здесь этот простой способ (примененный, кстати, в водородной бомбе) не годится.

При передаче тепла от горячего тела к холодному беспорядочно движущиеся атомы горячего тела как бы расталкивают атомы тела холодного. Беспорядок здесь готов, он только распространяется (ведь именно хаотическое движение частиц создает нагретость тел, причем средняя его энергия и соответствует температуре).

А если у нас нет заранее данного энергичного беспорядка, которым можно было бы «заразить» холодное вещество, то надо каким-то способом заново создать этот беспорядок. Только так удастся нагреть холодное тело, не имея горячего.

Вообразите, что две группы бегунов стремительно несутся навстречу. Вот они столкнулись, перемешались — какая началась толчея, неразбериха! Отличный беспорядок!

Примерно так же физики пытались получить высокую температуру, сталкивая газовые струи большого давления. Действительно, из прямолинейного движения атомов получалось беспорядочное, и температура газа поднималась довольно значительно. Такая система нагрева давала до 10 тыс. градусов, в свое время это был рекорд нагрева вещества в лаборатории: температура получалась выше, чем на поверхности Солнца.

Но это еще очень далеко до термоядерной температуры. И какими мощными ни делали газовые струи, как быстро ни сшибали их, за пределы 10 тыс. градусов не ушли.

Происходило это потому, что тепловой беспорядок на редкость «заразителен»: он мгновенно убегает от области максимального нагрева, «заражая» собой газ, расширяющийся во все стороны после столкновения струй.

Система грела окружающую среду, как греет печка воздух в комнате. Она не была изолирована.

Вспомните снова Солнце. Этот сверхгорячий шар идеально изолирован от окружающих тел — висит в пустоте мирового пространства и ни с чем не соприкасается. Правда, Солнце отдает тепло своими лучистыми потоками, но они ничтожно малы по сравнению с полной энергией светила.

Значит, если мы хотим изолировать наше искусственное солнце, его надо как-то «подвесить в пустоте», иначе его не удастся как следует разжечь.

Физики нашли путь, как осуществить эту идею. Они воспользовались тем, что термоядерное горючее при сверхвысокой температуре будет, как и водородное топливо Солнца, не в твердом, не в жидком, не в газообразном, а в плазменном состоянии, ибо при миллионах градусов атомы неминуемо расщепятся на ядра и электроны (подробнее о плазме см. в ст. «Семь состояний вещества»). Но ядра и электроны, как электрически заряженные частицы, подвержены действию электрических и магнитных полей. Это-то свойство плазмы физики и использовали.

В 50-х годах советские ученые, а за ними и ученые других стран провели ряд экспериментов.

Из закрытой трубки с электродами в торцах тщательно откачали воздух. Ввели в нее разреженный газ и через газ пропустили сильный электрический разряд. В газе возникло нечто похожее на молнию — **разрядный шнур плазмы**.

Вокруг шнура, как вокруг любого тока, появилось магнитное поле, силовые линии которого можно изобразить в виде колечек, охватывающих шнур (см. рис. 2 на цвет. табл. у стр. 121).

По мере нарастания тока это поле усиливалось, колечки силовых линий сжимались, стискивая шнур плазмы. В результате плазменные частицы неслись к оси шнура, и там возникала невообразимая толчея заряженных частиц. Это вело к резкому повышению температуры.

В подобных опытах температуру плазмы удалось поднять примерно до 2 млн. градусов. Так был достигнут новый рекорд наивысшей лабораторной температуры. Но и этого было мало для термоядерной реакции. К тому же разряды получались практически мгновенными, похожими на взрывы, а шнуры плазмы — неустойчивыми, да и не очень хорошо они были изолированы от стенок трубки: концы шнура непо-

средственно касались электродов, и те отсасывали тепло.

Тогда родилась другая мысль: приготовить сперва не горячую, а **холодную плазму**, собрать ее в быструю струю и впрыснуть в магнитное поле особой конфигурации, в так называемую магнитную бутылку. Там струя плазмы должна задержаться, частицы ее — запутаться, закружиться. Из прямого, упорядоченного движения частиц создастся хаос, беспорядок, а это-то и требуется, чтобы повысить температуру.

Холодная плазма, кстати говоря знакома всем: это она светится в трубках неоновых реклам, работает в газоразрядных лампах, в люминесцентных светильниках.

Холодную плазму можно в электрическом поле ускорить, собрать в достаточно быструю струю. Сложнее создать магнитную ловушку. Вот в общих чертах принцип ее устройства.

Его основа — цилиндрический соленоид, витки которого наложены неравномерно: посередине цилиндра — реже, у концов — гуще. Когда по катушке течет ток, внутри нее возникает магнитное поле, как в любом электромагните. Из-за неравномерности витков магнитное поле в катушке также неравномерно: у концов оно сильнее, чем на середине. Силовые линии идут подобно волокнам луковицы: сначала густо, потом реже, потом опять густо.

Магнитное поле такой формы и есть простейшая магнитная бутылка. Усиленные краевые области этого поля называются **зеркалами** или **пробками**.

Электрически заряженные частицы, попавшие в бутылку, могут задержаться в ней, словно рыба в сети. Ведь магнитное поле всегда отклоняет движущийся заряд — искривляет его траекторию. Если поле достаточно сильно, заряженная частица будет, не вылетая из бутылки, двигаться по спирали, как бы наматывая свой путь на силовую линию поля (см. рис. 3 на цвет. табл.).

А вблизи пробки, где силовые линии сгущены, частица не может пробиться сквозь их чащу (для этого ей нужна была бы дополнительная энергия) и поворачивает обратно; пролетев по спирали к противоположной пробке, частица опять будет отражена и снова направится внутрь бутылки и т. д. Предполагалось, что так можно уловить плазму.

К сожалению, поведение плазмы в магнитной бутылке значительно сложнее предположенного. Первые же эксперименты показали, что плазма ловится в магнитную ловушку, увы, очень неохотно.

В экспериментальном зале отдела плазменных исследований Института атомной энергии воздвигнуты внушительные установки, немного похожие на старинные паровозы. Называются эти установки пробкотронами. Их назначение — создать магнитные бутылки для плазмы.

На прочном высоком фундаменте лежит камера — широкий цилиндр, охваченный крепежными поясами и облицованный текстолитовыми блоками. С обоих торцов цилиндр закрыт, к нему подведены трубы вакуумных насосов. А вокруг цилиндра проложены трубчатые витки обмотки, в них течет охлаждающая вода. Внутри камеры размещены датчики приборов, от них идет множество проводов к пульту управления. К одному из торцов камеры присоединен инжектор плазмы: из него в камеру, где заранее подготовлен вакуум, впрыскивается плазменная струя.

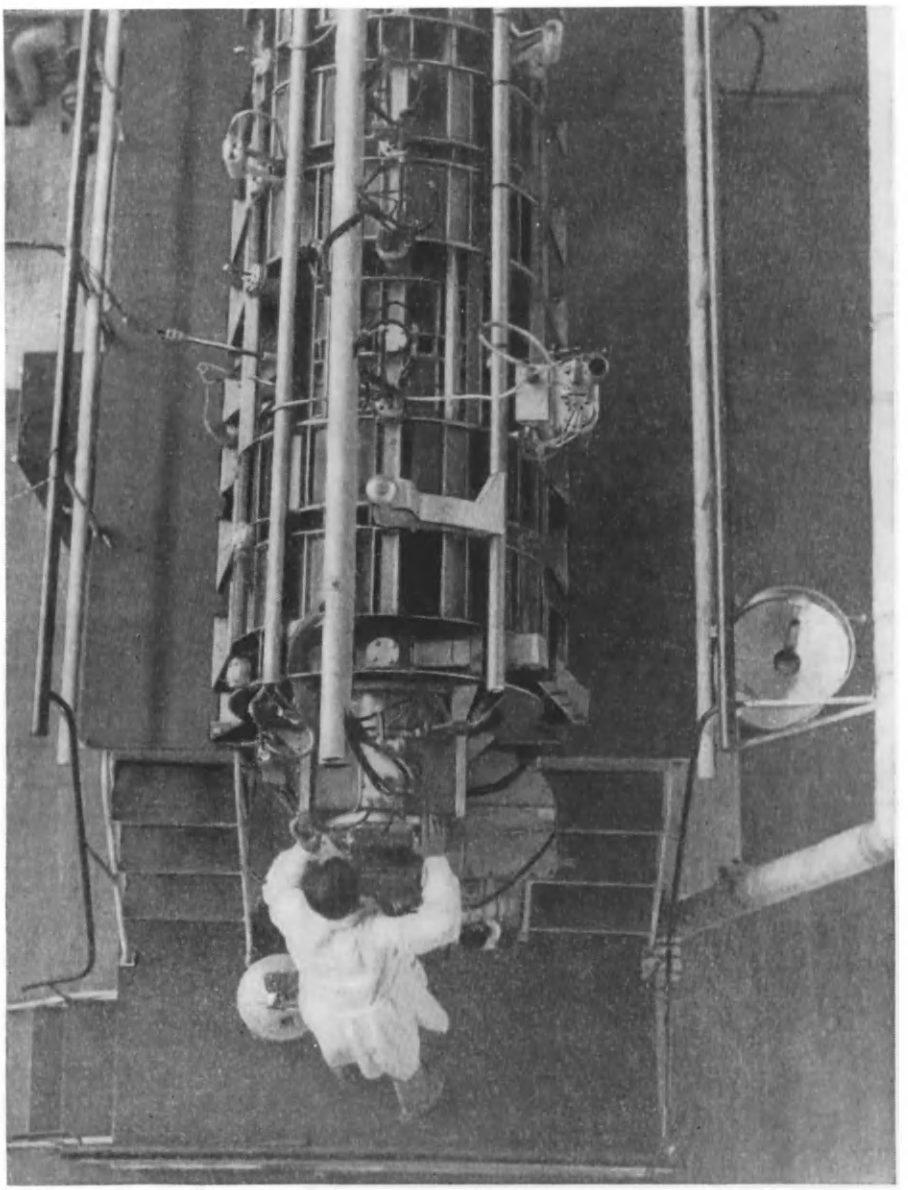
Электрическое питание установки столь обильно, что ее обслуживает специальный энергетический сектор — с трансформаторами, выпрямителями, конденсаторными батареями. Он находится внизу, в подвальном помещении.

Идет эксперимент. Огромной силы электрические импульсы обрушиваются в обмотку — токи в сотни тысяч ампер. Одновременно электронное автоматическое устройство впрыскивает в камеру струю водородной плазмы. На пульте, на белых экранах осциллографов, вспыхивают ярко-зеленые кривые, фиксирующие во всех тонкостях поведение плазменного облачка в магнитной ловушке.

Годы кропотливой работы потратили ученые на опыты в пробкотронах. Изучали особенности плазмы, ее капризы, которые на первых порах выглядели непреодолимыми, не поддающимися никакому укрощению. Эфемерное облачко плазмы было неустойчивым и существовало миллионные доли секунды. Плазма не держалась в ловушке, касалась стенок камеры и неминуемо гибла.

И все-таки опыт накапливался. Наряду с бесчисленными наблюдениями велись теоретические исследования. Предлагались новые режимы воздействия на плазму, новые структуры обмоток и магнитных полей в ловушке. И мало-помалу упорство ученых начало побеждать.

В 1962 г. в Институте атомной энергии был достигнут заметный успех. Пробкотрон снабдили дополнительной продольной стабилизирующей обмоткой, и водородную плазму удалось нагреть до сверхзвездной температуры —



**Пробкотрон, построенный в 1962 г. в отделе плазменных исследований Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. В этом пробкотроне удалось нагреть разреженную плазму ($10^{10}$ частиц на кубический сантиметр) до 40—50 млн. градусов на тысячные и даже сотые доли секунды. Снимок сделан сверху; пробкотрон установлен на высоком помосте.**

40—50 млн. градусов. Особенно ценно то, что такая горячая плазма была задержана в ловушке на тысячные, даже на сотые доли секунды. Жизнь плазмы удлинили таким образом в сотни тысяч раз. Правда, плотность нагретой плазмы была сравнительно небольшой — $10^{10}$ частиц на 1 $см^3$.

Затем последовали новые успехи. Стремясь постичь тонкие свойства плазмы, физики далеко продвинули теоретические исследования этого своеобразного состояния вещества.

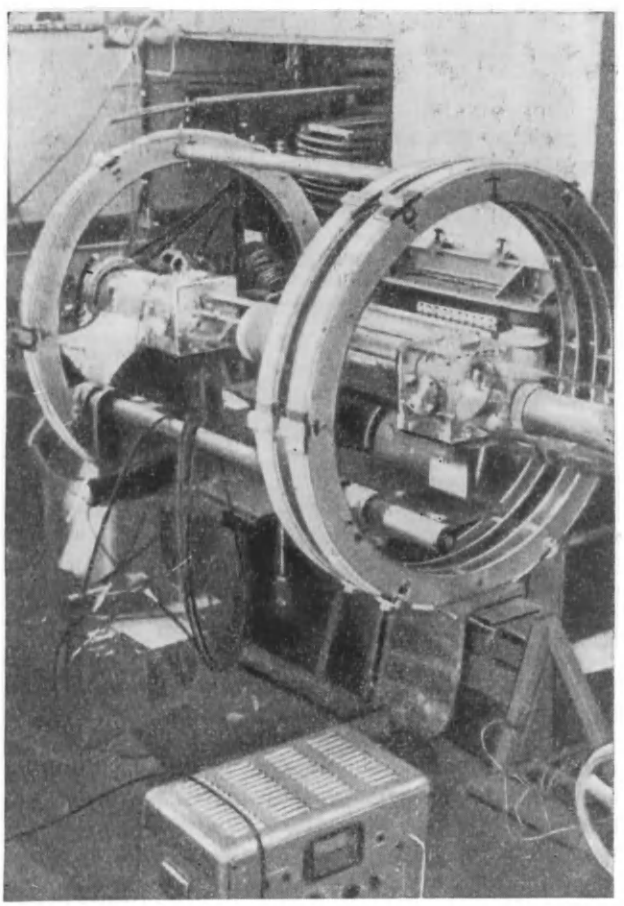
На службу удалось поставить так называемые **коллективные взаимодействия в плазме**, т. е. взаимные влияния ее сгущений, комков, неоднородностей, в тот короткий период, когда в ней еще не произошли парные столкновения частиц.

В Институте атомной энергии провели, например, такой эксперимент. В магнитную ловушку впрыснули встречные потоки холодной плазмы. В момент, когда они пронзили друг друга, на них обрушили мощный и очень корот-

кий удар магнитного поля. Непосредственно на ядра этот удар почти не подействовал: они слишком массивны. Зато в электронных потоках тотчас нарушилась однородность, возникли вихри, «толпы» частичек. От электронов это групповое хаотическое движение тут же передалось ядрам, и их температура подскочила до десятков миллионов градусов.

Так, в сравнительно небольшой лабораторной установке плазму удалось нагреть обходным путем, используя коллективные взаимодействия. При этом с пользой применили ту самую склонность к неустойчивости, которая в других аппаратах обычно разрушала плазменное облачко.

Иначе поступили ученые Института ядерной физики Сибирского отделения Академии наук в Новосибирске. На плазму, поїманную пробкотроном, они обрушили такой сильный и резкий удар магнитного поля, что в плазме произошло опрокидывание ударной волны. Получилось нечто похожее на морской бурун. Примерно так же опрокидываются крутые водяные волны, образуя пенистые гребни — барашки, в которых частицы беспорядочно мечутся в разные стороны. В результате опрокидывания ударной волны температура ядер в плазме тяжелого водорода (плотностью $10^{13}$ частиц на 1 $см^3$) поднялась до рекордной величины — 100 млн. градусов. На десятки микросекунд в установке зажглась физическая термоядерная реакция. Она заявила о себе нейтронами, освободившимися при «звездном» синтезе ядер легкого гелия. В физической лаборатории на мгновение вспыхнула искра искусственного солнца!



**Весной 1964 г. эта установка была построена в Институте ядерной физики Сибирского отделения Академии наук СССР. В ней удалось нагреть плазму тяжелого водорода плотностью в $10^{10}$ частиц на кубический сантиметр до 100 млн. градусов. Широкие кольца, охватывающие камеру,— это обмотка пробкотрона, создающего магнитную ловушку.**

Правда, от этого проблеска еще далеко до решения проблемы. Лабораторные реакции не дают пока ни джоуля энергии, наоборот, они ее довольно жадно поглощают. Чтобы возбудить энергетически выгодный термоядерный процесс, ядра в плазме тяжелого водорода (плотностью $10^{14}$—$10^{15}$ частиц на 1 $см^3$) предстоит экономно нагреть до 500 миллионов и даже до миллиарда градусов и удержать в течение секунды. Эти требования варьируются: при большей плотности плазмы ее температура и время удержания могут быть уменьшены. Однако невозможно достичь цели, если, скажем, заботиться только о повышении температуры. Задача должна быть решена комплексно.

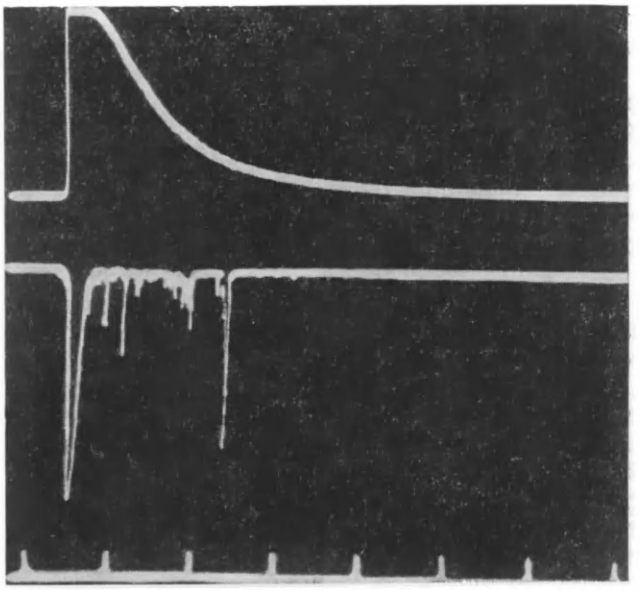
Даже при исполнении всех этих требований останутся еще огромные технические трудности: нужно научиться создавать гигантские (в сотни тысяч эрстед) магнитные поля, высокий вакуум в достаточном объеме (ведь термоядерное горючее будет в сотни миллионов раз разреженнее комнатного воздуха), разработать и получить жаропрочные, но не загрязняющие вакуум материалы для внутренних частей камер и т. д. Словом, до энергетического термоядерного реактора еще не близко. Сегодня главная цель физиков — как можно глубже понять плазму, научиться обращаться с ней.

Исследования идут интенсивно и широким фронтом. И не только в пробкотронах. Ставятся опыты в так называемых тороидальных камерах. Там плазма находится в кольцевой трубе, вроде полого бублика, и представляет собой как бы замкнутый виток мощного понижающего трансформатора. Раскаляется она мощным импульсом электрического тока.

Есть камеры, где плазма, схваченная в магнитную ловушку, резко сжимается нарастающим магнитным полем; тогда она нагревается по тому же закону, по которому греется воздух под поршнем велосипедного насоса. Есть камеры и в форме восьмерки. Они тоже дают надежду получить устойчивую горячую плазму.

Несмотря на огромные трудности (и принципиальные и технические), физики и инженеры уверенно продвигаются по пути к искусственному солнцу. Настанет день, и их огромная работа увенчается полным успехом. Когда это произойдет? Ученые не очень-то любят такие прогнозы. Называются разные сроки — от 5 до 50 лет.

Промышленный, управляемый термоядерный реактор будет самой замечательной энергетической установкой из всех изобретенных человеком. Научившись «сжигать воду» в искусственном солнце, мы получим источник топлива, равноценный 500 океанам, в которых вместо воды была бы нефть! Трудно даже вообразить себе, к какому бурному прогрессу приведет это индустрию, сельское хозяйство, науку. Получив изобилие энергии, человек сможет осуществить самые дерзкие мечты, вплоть до кардинального преобразования Земли, ее природы, ее климата. Всюду, где потребуется, люди пошлют воду в пустыни, согреют холодные моря, осушат болота, обнажат запасы полезных ископаемых, полностью, до конца подчинят себе все сокровища нашей планеты.



**Лабораторный документ нагрева плазмы в установке Новосибирского института ядерной физики. Верхняя кривая показывает количество нейтронов, вылетавших из плазмы при вспышке термоядерного синтеза. Нижняя кривая показывает количество ионов с энергией в 10 000 электрон-вольт, что соответствует температуре 100 млн. градусов. Под кривыми — деления, показывающие время. Каждое деление соответствует 10 микросекундам.**

Сказочное энергетическое богатство откроет новую эру в истории, эру невиданного изобилия и поистине фантастического умножения человеческого могущества.

■

# ПЯТЬСОТ ТЫСЯЧ АТМОСФЕР

## ЧТО ТАКОЕ ДАВЛЕНИЕ?

Почему кончик иголки должен быть острым? Почему человек проваливается в рыхлый снег, а на лыжах стоит на нем прочно? Почему у вездехода широкие шины? Чтобы ответить на эти и многие другие вопросы, нужно вспомнить, что такое давление.

Давление — это сила, приложенная к единице площади. Поэтому вес человека, распределенный на площадь его подошв, — это давление. Сила, с которой нажимает наперсток, приложенная к площади кончика иглы, — это давление.

Вычислим его. Предположим, что диаметр кончика иглы равен 0,01 *мм*, или $10^{-3}$ *см* (а это еще тупая игла). Тогда площадь кончика равна $\left(\frac{3{,}14}{4} \times 10^{-6}\right)$ *см*$^2$. Если наперсток нажимает на иглу с силой в 1 *г*, то давление под кончиком будет 1275 *кг/см*$^2$, или 1275 *атм* *. Жало ко-

* В системе единиц СИ давление измеряют ньютонами на квадратный метр (*н/м*$^2$). Но так как эта единица очень мала, то в технике пользуются другой единицей, которая называется б а р о м. 1 *бар* = $10^5$ *н/м*$^2$.

Бар очень близок к старым единицам давления: к технической атмосфере (0,9806 *бар*) и к физической атмосфере, т. е. к атмосферному давлению на уровне моря (1,013 *бар*).

В технике высоких давлений пока еще пользуются старой единицей измерения — **технической атмосферой**, которую обозначают *атм*. Поэтому и мы в статье будем указывать давление в технических атмосферах.

мара еще тоньше, чем игла, и понятно, почему комар так легко прокалывает кожу.

Вес человека — около 70 *кгс*, площадь подошв на его ботинках — примерно 500 $см^2$. Значит, давление на пол равно 0,14 *атм*. Много ли это? Вероятно, нет. Но этого достаточно, чтобы продавить снег. Площадь лыж около 4000 $см^2$, т. е. в 8 раз больше. Следовательно, давление лыжника на снег в 8 раз меньше. Уже не провалиться!

Вспомним теперь, что собой представляет атмосферное давление. Это вес воздуха, приходящийся на единицу площади. Атмосферное давление убывает при подъеме на высокие горы, растет при опускании в шахты, и поэтому его обычно измеряют на определенном уровне — на уровне моря. Здесь на 1 $см^2$ поверхности давит сила тяжести около 1 *кгс*. Отсюда и пошло обозначение: техническая атмосфера — это 1 $кгс/см^2$. Попутно стоит вспомнить, что площадь (не поверхность!) человеческого тела равна приблизительно 1000 $см^2$, следовательно, на нее давит около тонны.

А если спуститься под воду? Там давление возрастает. Ведь плотность воды в тысячу раз больше плотности воздуха. На каждые 10 *м* глубины давление возрастает приблизительно на одну атмосферу и на глубине 10 *км* уже достигает примерно 1000 *атм*. В толще Земли давление возрастает еще сильнее. В центре Земли оно достигает нескольких миллионов атмосфер.

## КАКОВ ПРЕДЕЛ ДАВЛЕНИЯ?

А вообще каков предел величины давления? Нижний предел — это абсолютный вакуум. В пространстве, где нет ни одной частицы вещества, давление равно нулю. А верхний предел?

Попробуем представить себе ящик, стенки которого могут выдержать любое давление. Начнем нагнетать в него газ. Пусть это будет, скажем, двуокись углерода — обычная углекислота, которой газируют воду. По мере того как мы будем накачивать углекислоту, число ее молекул в ящике начнет расти. Плотность газа и давление тоже возрастут. Молекулам в ящике станет теснее. При некоторой плотности газ начнет превращаться в жидкость. Если продолжать накачивание, количество молекул в ящике станет еще больше, расстояние между ними будет сокращаться. Силы взаимодействия между молекулами также увеличатся. Молекулам станет все труднее двигаться в ящике. Возрастет вязкость двуокиси углерода, и при давлении в несколько тысяч атмосфер она затвердеет. Продолжим сжатие. Предположим, что одна стенка ящика подвижная, и, перемещая ее как поршень, мы сжимаем твердую двуокись углерода. При давлениях в десятки тысяч атмосфер молекулы подойдут так близко друг к другу, что это станет мешать электронам двигаться вокруг ядер. Появятся искажения электронных оболочек.

Более половины химических элементов устроено так, что на их внутренних электронных орбитах есть свободные места. При дальнейшем сжатии (до сотен тысяч атмосфер) электроны в таких атомах начнут сдвигаться на свободные места поближе к ядру. При этом обычные химические свойства элементов настолько изменятся, что может даже образоваться новая периодическая система элементов.

При давлениях в миллионы и более атмосфер может оказаться, что электронам выгоднее вращаться не вокруг отдельных ядер, а в виде «электронного газа» вокруг всех ядер: вещества переходят в металлическое состояние. Именно из такого вещества состоят белые карлики — звезды, внутри которых давление достигает $10^{16}$ *атм* (десять квадрильонов атмосфер!), а плотность такова, что 1 $см^3$ вещества обладает массой в несколько тонн.

## КАК СОЗДАЮТ ДАВЛЕНИЕ?

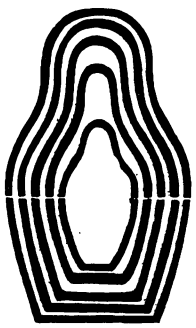
Вернемся в наши привычные земные условия. Здесь мы очень часто встречаемся со сравнительно высоким давлением и используем его. Под давлением находится в баллоне двуокись углерода, о которой мы уже говорили. Давление газов в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания толкает поршень и двигает автомобили, самолеты, теплоходы. В стволе орудия давление пороховых газов доходит до нескольких тысяч атмосфер и выталкивает снаряд. Давление газа в недрах Земли заставляет нефть бить фонтаном из скважины. Давление пара достигает десятков и сотен атмосфер, оно движет поршни паровой машины, лопасти турбины. Давление используют в гидромониторах — водяных пушках, которые струей воды режут и размывают грунт...

Мы показали, что происходит при сжатии вещества в простом ящике. В действительности же давление создается в сложных аппаратах. Газы сжимают компрессорами. Они засасывают газ из газгольдеров (газосборников) и сжимают его последовательно в нескольких цилиндрах-ступенях до давлений в сотни

и тысячи атмосфер. Это очень сложные, мощные и точные машины; поршни в них так хорошо пригнаны к цилиндрам, что молекулы газа никак не могут прорваться в зазор. Сейчас уже существуют машины, способные сжать газ до 10 тыс. *атм*. При обычной температуре и давлении между 10—20 тыс. *атм* многие газы затвердевают. Такое же превращение, но при меньшем давлении происходит и с жидкостями. А вот твердые тела можно сжимать сколько угодно, только бы выдержал сосуд, в котором это вещество находится.

## КАКОЕ ДАВЛЕНИЕ МОЖЕТ ВЫДЕРЖАТЬ САМ АППАРАТ?

Это прежде всего зависит от прочности материала, из которого он сделан. Разумеется, для изготовления аппаратов высокого давления применяют наилучшие и самые прочные материалы — легированные стали и сплавы. Но если в цилиндр, сделанный из лучших сортов стали, накачивать газ, то при любой толщине стенок этот цилиндр не выдержит давление больше чем 20 тыс. *атм* — он разорвется.



Принцип аппарата с гидравлической поддержкой примерно тот же, что и у игрушки «матрешки».

Как же увеличить его прочность? Как построить аппараты, способные выдержать сотни тысяч и даже миллионы атмосфер, при которых в веществе происходят такие удивительные превращения? Вот, например, один из способов решения этой задачи. Сосуд, в котором нужно создать высокое давление, можно вставить в такой же сосуд больших размеров, этот — в еще больших и так далее, и устроить стальное подобие игрушки «матрешки». В пространствах между сосудами нужно создать давления, отличающиеся друг от друга на 10—20 тыс. *атм*. При достаточно большом количестве таких, вставленных друг в друга сосудов давление во внутреннем сосуде теоретически может быть доведено до любой величины (рис. 1). Но изготовить такой аппарат неимоверно трудно.

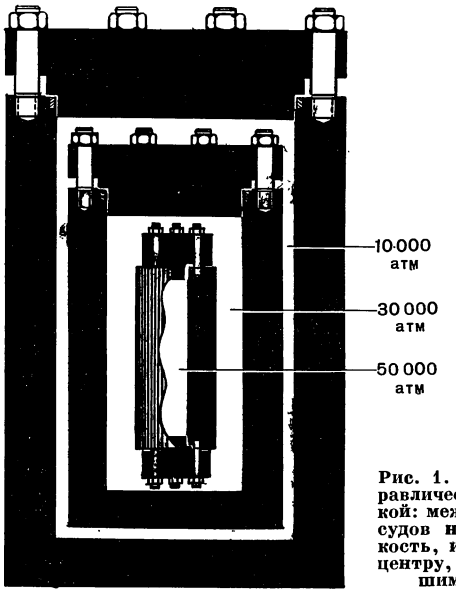



**Рис. 1. Аппарат с гидравлической поддержкой: между стенками сосудов нагнетается жидкость, и, чем ближе к центру, тем под большим давлением.**

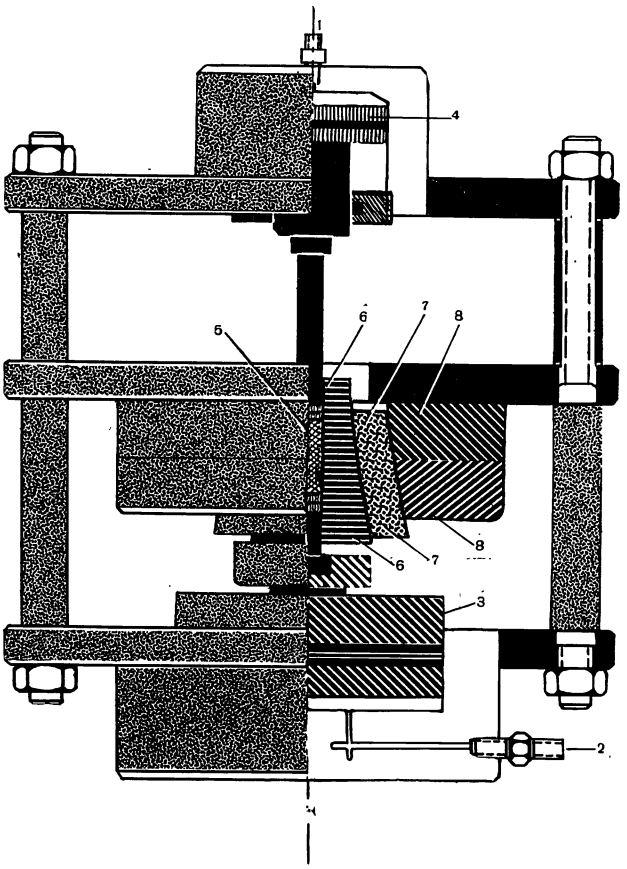



**Рис. 2. Аппарат с коническими оправками (мультипликатор с двойной поддержкой): *1* и *2* — штуцеры, через которые к поршням подается под высоким давлением масло, *3* и *4* — поршни, *5* — исследуемое вещество, *6*, *7* и *8* — обкладки.**

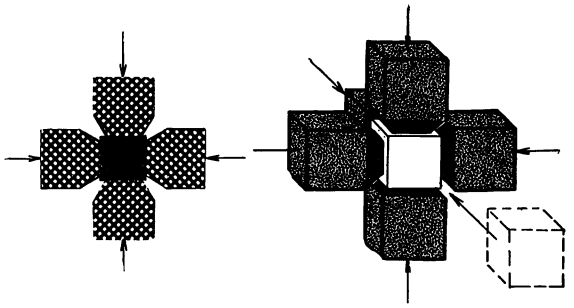


Рис. 3. Схема сжатия куба.

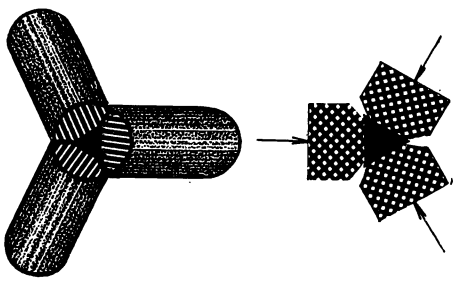


Рис. 4. Схема сжатия тетраэдра.

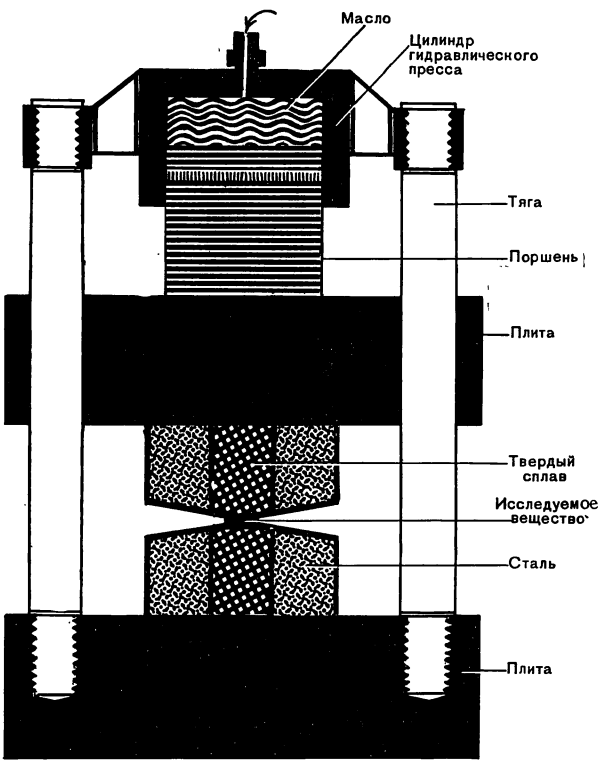



Рис. 5. Гидравлический пресс с «наковальнями».

Была предложена и другая конструкция. Сосуду, предназначенному для создания высокого давления, придают коническую форму и вставляют его в стальное кольцо с коническим отверстием. Если вдавливать этот сосуд в кольцо, которое называют **оправкой**, то он действует как клин — стремится расширить кольцо, но сам сдавливается. На поверхности этого конического сосуда возникает давление, которое будет стремиться сжать сосуд. Такой сжатый, или, как его называют, поддержанный, конусный сосуд может выдержать гораздо большее давление. Этот прием можно повторить: сделать оправку тоже конической и вставить ее во вторую оправку. Тогда внутри конусного сосуда можно создать еще большее давление. Такой аппарат изображен на рисунке 2. Здесь мы видим конический сосуд с двумя ступенями поддержки и два гидравлических пресса, передвигающих стальные поршни, между которыми находится исследуемое вещество.

Чтобы привести в действие всю систему, нужно насосом высокого давления подать масло в штуцеры *1* и *2*. Тогда в пространствах за поршнями *3* и *4* давление поднимается и поршни начинают сжимать вещество. Поддерживающее давление можно регулировать, перемещая нижний поршень. В таком аппарате можно достичь давления от 50 до 100 тыс. *атм*.

Любое вещество сопротивляется сжатию больше, чем растяжению. Используя это свойство материалов (особенно твердых), придумали такую конструкцию аппарата, в которой все части, находящиеся под очень большим давлением, только сжимаются. Схемы таких аппаратов изображены на рисунке 3. Кубик вещества находится между шестью поршнями из наитвердейшего сплава — карбида вольфрама. Эти поршни одновременно передвигаются к центру системы мощными гидравлическими прессами. Веществу деваться некуда, оно может только медленно выдавливаться (течь) в щели между поршнями. В результате внутри вещества развиваются огромные давления— до 200 тыс. *атм*. В другой схеме (рис. 4) веществу придают вид тетраэдра и сжимают его четырьмя поршнями с треугольными наконечниками.

Самые высокие, так называемые статические, т. е. поддерживаемые длительное время, давления достигнуты в аппаратах, которые построены по принципу молота и наковальни. Ведь обычные молот и наковальня остаются при ковке целыми,а кусок железа сильно меняет свою форму. Из очень твердого сплава изготовляют две наковальни и помещают их между плитами мощ-

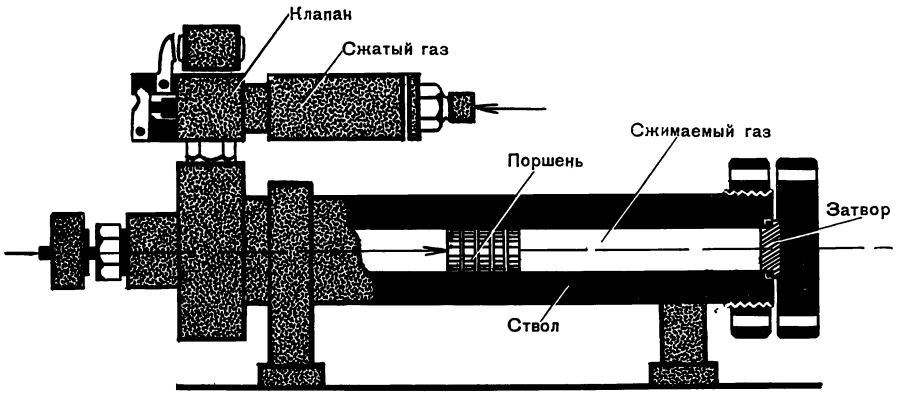



Рис. 6. Адиабатическая пушка.

ного гидравлического пресса (рис. 5). Между наковальнями находится тонкий слой исследуемого вещества. При сжатии таких плит в веществе развивается огромное давление. Его уже удалось довести до полумиллиона атмосфер. Большего давления не выдерживает материал, из которого сделаны наковальни.

Подсчитаем, с какой силой нужно сжать наковальни, чтобы достичь такого давления. Пусть диаметр основания наковальни, на котором расположено вещество, равен 1,6 *см*. Тогда площадь наковальни равна приблизительно 2 $см^2$. Значит, чтобы получить давление в 0,5 млн. *атм*, нужно сжать плиты с силой 1000 *т*. Что же такое 1000 *т*? Это груз двадцати 50-тонных товарных вагонов. Целый поезд!

Кроме статического давления, существует еще динамическое, быстроменяющееся давление; оно возникает и уменьшается в доли секунды. Таково, например, давление взрыва. Динамические давления возникают в двигателях внутреннего сгорания, в орудиях и т. д.

Представим себе, что выходное отверстие в стволе артиллерийского орудия закрыто стальной пробкой. Если таким орудием произвести выстрел, то снаряд, который легко пробил бы броню танка, эту пробку не пробьет. Он долетит почти (почти!) до этой пробки, остановится и... полетит обратно. Не даст ему пробить пробку сжатый газ. Ведь в стволе орудия находится воздух. При выстреле снаряд в стволе, как поршень, гонит перед собой воздух. В конце ствола давление воздуха и его плотность настолько увеличатся, что воздух начнет действовать, как мощная пружина, и остановит снаряд. А дальше, как всякая пружина, воздух разжимается (расширяется) и двигает снаряд обратно. Так как сжатие в этом случае происходит в доли секунды, то газ нагревается до очень высокой температуры.

На этом принципе созданы установки для так называемого адиабатического, т. е. без обмена тепла с окружающей средой, сжатия газа (рис. 6). В такой установке можно получить давление до 20 тыс. *атм* и одновременно температуру до 10000°. Это дает возможность ученым исследовать поведение сжатых и нагретых газов и их взаимодействие между собой. Интересно напомнить, что в XVIII в. такой принцип был использован для постройки воздушного огнива. Это была трубка, закрытая с одного конца. В трубке двигался поршень. При быстром вдавливании поршня воздух в трубке нагревался и воспламенял трут.

Итак, в настоящее время в лабораториях достигают давлений до полумиллиона атмосфер. Для чего же это нужно? Давление сильно изменяет свойства вещества. В первую очередь меняется его плотность. И это изменение плотности приводит к удивительным явлениям.

## ПОЛИМОРФНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Одно и то же вещество может принимать различные, так называемые аллотропические формы: кислород и озон, графит и алмаз. У химических соединений такие аллотропические формы называются полиморфными модификациями (см. ст. «Твердое тело и его загадки»). При изменении окружающих условий — температуры, давления,—когда это изменение достигло определенной стадии, вещество из одной аллотропической формы переходит в другую и приобретает другие химические или физические свойства. Эта точка так и называется точкой перехода. Различные аллотропические формы бывают не только у веществ, состоящих из одного химического элемента, но и у многих химических соединений (полиморфные формы).

В наше время считают, что при давлениях до 50 тыс. *атм* у каждого химического соединения возможен по крайней мере один полиморфный переход. Опыты показывают, что у многих веществ их гораздо больше. Известно, что у камфары их одиннадцать, у воды — семь, у висмута — восемь и т. д. Остановимся на воде. При 0° Ц вода замерзает. Если лед сжимать, то

при 30 тыс. *атм* образуется форма льда-VII, который плавится при +190° Ц. Значит, на таком куске льда можно было бы жарить пищу, если бы лед-VII сохранял свои свойства и при снижении давления. Лед-VII обладает необычайной твердостью и может поэтому стать причиной катастрофы. В подшипниках, в которых вращаются валы мощных турбин, развивается огромное давление. Если в смазке есть хоть немного воды, она замерзает. Образовавшийся лед, как песок, трет вал и подшипник и быстро выводит их из строя.

В природе существуют и необратимые переходы: вещества, полученные под давлением, сохраняют свои свойства и после того, как давление снято. К таким веществам относится углерод. Этот элемент может существовать в виде двух полиморфных модификаций — графита и алмаза. Как только это было установлено, начались попытки превратить графит в алмаз. На цветной таблице у страницы 376 изображены кристаллические решетки графита и алмаза. В графите атомы углерода расположены в углах шестиугольников и слои этих шестиугольников находятся на расстоянии 3,4 Å друг от друга. Слои шестиугольников, как чешуйки, скользят друг по другу. Поэтому графит иногда употребляют для смазки.

В алмазе атомы углерода находятся в вершинах тетраэдра, длина ребра которого равна 1,54 Å. Таким образом, в алмазе расстояние между атомами почти вдвое меньше, чем в графите. Алмаз—самое твердое вещество на свете. Кроме того, так как алмаз встречается в природе довольно редко, он считается драгоценным камнем и стоит очень дорого. Не удивительно, что уже давно люди стремились найти способ, как превратить графит в алмаз. На решение этой проблемы было потрачено немало сил и средств. Много было разочарований, прежде чем эта проблема была решена. А решили ее только, когда был найден научный путь, когда были накоплены знания и достигнут определенный уровень развития техники. В 50-х годах нашего века нашли способ осуществлять искусственно полиморфный переход графита в алмаз. В наше время уже налажено промышленное производство технических алмазов.

Чтобы графит мог перестроиться в алмаз, нужно не только сжать его до давлений в сотни тысяч атмосфер, но и нагреть при этом до очень высокой температуры. Правда, графит можно превратить в алмаз и при комнатной температуре при давлении всего около 10 тыс. *атм*, но тогда нужно было бы ждать века, пока получится хоть крупинка алмаза. Высокая температура нужна, чтобы процесс превращения шел быстро. А чем выше температура процесса, тем большее давление требуется, чтобы получить алмаз.

Кроме высокой температуры, для перехода графита в алмаз нужны катализаторы — вещества, ускоряющие процесс. Правда, в последние годы научились обходиться и без них.

Аппарат, в котором осуществляется синтез алмаза, изображен на рисунке 7. Он состоит из многослойного кольцевого сосуда. Внутренний слой сделан из сверхтвердого сплава. На этот слой надеты пояса (бандажи) из твердой стали, мягкой стали, меди и пояс, в котором циркулирует холодная вода. Такое чередование материалов уменьшает опасность разлета осколков, если аппарат разрушится.

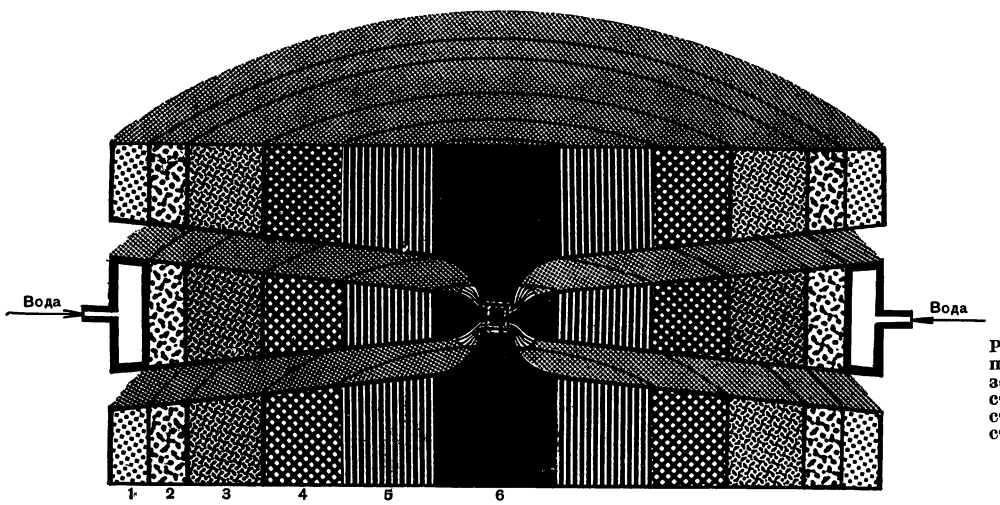



**Рис. 7. Схема бандажного аппарата для получения алмазов: *1* — медь, *2* — мягкая сталь, *3* — сталь, *4* — твердая сталь, *5* — самая твердая сталь, *6*—карбид вольфрама.**

Сверху и снизу аппарат закрыт многослойными крышками. Внутренние части — это штампы из сверхтвердого сплава. На конусные части штампов надевают прокладки из пирофиллита (минерал — алюмосиликат железа). Он обладает свойством становиться при очень высоких давлении и температуре пластичным.

Внутрь кольцевого сосуда вставляют контейнер из пирофиллита. В контейнере находятся графитовый стержень и катализатор. Все три части аппарата собирают и вставляют в гидравлический пресс. Затем сжимают плиты пресса и начинают увеличивать давление в аппарате. Пирофиллит заполняет все неплотности между штампами и кольцевым сосудом и предотвращает падение давления.

Чтобы нагреть содержимое контейнера, через штампы пропускают ток большой мощности. Штампы изолированы от плит пресса и соединены металлическими прокладками с графитовым стержнем в контейнере. Ток, проходящий через эту электрическую цепь, нагревает графит до 3000°Ц.

Проходят десятки минут, и процесс закончен. Внутри контейнера уже не графит, а кристаллики алмаза с ребром до 2 *мм*.

Алмаз ценится не только как украшение. Прежде всего его ценят за необычайную твердость. Из алмазов изготовляют резцы, сверла, фрезы, шлифовальные круги, буровые коронки. Алмазные инструменты обрабатывают самые твердые сплавы с необычной скоростью, точностью и чистотой.

Несколько лет назад был найден еще один полиморфный переход. Нитрид бора (BN) — белый порошок, решетка которого очень сходна строением с решеткой графита,— может под давлением 70 тыс. *атм* и при температуре около 1500°Ц необратимо перестроиться в **боразон.** Решетка этой новой полиморфной формы схожа с решеткой цинковой обманки (ZnS). Твердость боразона сравнима с твердостью алмаза, а термическая стойкость его еще выше.

## ДАВЛЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

Огромную роль играет давление в химии. Известно, что для производства пороха нужна селитра: калиевая, натриевая или аммонийная соли азотной кислоты. До первой мировой войны основным поставщиком селитры была страна Чили, обладавшая огромными залежами калиевой селитры. Вскоре после начала войны Германия оказалась в катастрофическом положении: морская блокада сделала доставку селитры из Чили невозможной. И тогда немецкие химики разработали метод, позволявший синтезировать аммиак из азота и водорода. Из аммиака получали азотную кислоту и аммиачную селитру. Германия стала производить собственную селитру.

Такой процесс синтеза аммиака был производительным и удобным только потому, что его вели под давлением в несколько сот атмосфер. Давление оказалось необходимым, потому что оно значительно ускоряет химические реакции. Прежде всего оно увеличивает концентрацию компонентов, т. е. их содержание в единице объема. Кроме того, реакция синтеза аммиака

$$3\,H_2 + N_2 \rightleftarrows 2\,NH_3$$

идет с уменьшением объема: из трех объемов водорода и одного объема азота получаются два объема аммиака. При увеличении давления система (азот + водород + аммиак) словно сопротивляется этому и, чтобы снизить давление, дает аммиак.

Сейчас во всем мире заводы синтетического аммиака вырабатывают десятки миллионов тонн аммиачной селитры — одного из самых распространенных минеральных удобрений.

Так называемые колонны синтеза, т. е. сосуды, в которых синтез аммиака осуществляется на катализаторе,— это гигантские стальные трубы диаметром до 1,5 *м* и высотой в 10—15 *м*. Толщина стенок у этих труб достигает 20 *см*. За час они перерабатывают десятки кубометров азотоводородной смеси. Мощные компрессоры подают эту смесь под давлением 300 *атм*. В колоннах синтеза под таким давлением и при температуре 400—500°Ц азотоводородная смесь, соприкасаясь с катализатором, превращается в аммиак.

В наше время много химических продуктов получают в промышленности с помощью высокого давления, например метиловый спирт, уксусную кислоту. На производство этилового спирта еще недавно расходовали сотни тысяч тонн зерна и картофеля. Теперь спирт получают под давлением из воды и этилена — газа, выделяющегося в большом количестве при добыче и переработке нефти. Тот же этилен при давлении в 1500—3000 *атм* полимеризуется в полиэтилен—пластическую массу, обладающую рядом ценных качеств (см. ст. «Полимеры»). Под давлением производят и синтетические волокна. Можно насчитать еще около 100 технологических процессов, которые стали возможными благодаря применению давления.

## ЧТО НУЖНО ЗНАТЬ, ЧТОБЫ ПОСТРОИТЬ ХИМИЧЕСКИЙ ЗАВОД?

Постройка завода, на котором аппараты работают под давлением,— дело сложное. Оно требует многих знаний. Прежде всего для этого надо знать, как ведут себя под давлением различные жидкости, газы и твердые тела, когда они находятся в одном аппарате. Пока эти вещества не прореагируют друг с другом, они будут соприкасаться и смешиваться, газы будут растворяться в жидкостях, а жидкости и даже твердые тела — в сжатых газах. Химику, инженеру-технологу и проектировщику надо знать, как это все происходит.

Как ведут себя вещества под повышенным давлением, должен знать не только работник химической промышленности, но и вообще каждый хороший инженер. Долгое время не могли, например, понять, почему на лопатках паровых турбин оседает соль. В воде, которую подводят в паровые котлы, есть соль, но ведь в турбину попадает не вода, а пар. И кому же не известно, что из пара получают дистиллированную воду? Следовательно, на лопатки турбины попадают каким-то образом водяные брызги. Чтобы избежать этого, устанавливали всякие отбойники, брызгоуловители, отсекатели, но ничего не помогало. Разгадка пришла, когда было выяснено, что под высоким давлением водяной пар прекрасно растворяет твердую соль и уносит ее в турбину. Стало ясным, что котлы надо питать водой, в которой нет соли.

А свойство сжатого пара растворять соль научились использовать для получения ценных веществ. Этот принцип применили, например, для выращивания огромных кристаллов кварца. В паре, сжатом компрессором, при высокой температуре растворяют кремнезем ($SiO_2$), а затем, снизив температуру, кристаллизуют из газового раствора кварц. Так выращивают кристаллы чистейшего кварца (горного хрусталя) весом в несколько килограммов. Такие кристаллы нужны радиотехнике. Из них изготовляют пьезокварцевые пластинки (см. ст. «Звук»).

Так же синтезируют и другие ценные минералы. Этот метод называют гидротермальным синтезом, потому что процесс идет в водяном паре при высокой температуре. Кстати, такие же условия — высокая температура и большое давление — существуют и в глубине Земли. Там тоже вырастают кристаллы минералов, в частности кварц, только значительно медленнее, чем в наших лабораториях и заводских установках.

Сжатые газы, так же как пар, растворяют жидкости и твердые тела. Инженерам химической промышленности хорошо известно, что газ, прошедший через компрессор, несет в себе масло, которым смазывают поршни компрессора. При этом разные газы по-разному загрязняются такой нежелательной примесью. Никакими фильтрами и отбойниками не удается очистить загрязненный маслом газ. Удалить масло можно, только охладив газ или снизив давление.

Не следует забывать, что речь идет о больших количествах жидкости, попадающей в газ. Опыты показали, что, например, 1 $м^3$ этилена при 2 тыс. *атм* и 25°Ц растворяет до 3 *кг* масла. При 45°Ц и 300 *атм* такое же количество этилена растворяет до 0,5 *кг* нафталина, а 1 $м^3$ двуокиси углерода — до 200 *г* нафталина.

Это свойство сжатых газов было использовано: предложили новый способ разгонки сложных жидких смесей. Разные жидкости поразному растворяются в газах. При определенных давлении и температуре газ растворит определенную часть смеси. А затем, снижая давление, можно выделить из газа растворенную жидкость. При этом происходит изотермическая перегонка, т. е. перегонка при одной и той же температуре и переменном давлении.

Вообще же не следует удивляться, что жидкости и твердые тела хорошо растворяются в сжатых газах. Ведь плотность сильно сжатого газа близка к плотности жидкости. Например, плотность азота при 10 тыс. *атм* и 25° Ц равна 1,25 $г/см^3$, т. е. такой азот может тонуть в воде. Эта особенность сжатого газа проявляется в явлении, открытом сравнительно недавно. Оказывается, два газа, сжатые высоким давлением, не смешиваются, а расслаиваются на два слоя, как масло и вода. Граница раздела газовых слоев сфотографирована через прочные стекла; даже измерено поверхностное натяжение на этой границе.

## ДАВЛЕНИЕ И ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Увеличение давления до нескольких атмосфер сильно действует на организм человека (см. ст. «Человек покоряет океан»). А вот глубоководные рыбы живут под давлением в сотни атмосфер и, наоборот, гибнут, когда их вытягивают на поверхность воды. Некоторые виды бактерий преспокойно выдерживают давления в тысячи атмосфер, но гибнут при давлении в 7 тыс. *атм*: вода в их клетках превращается в одну из полиморфных модификаций льда и

разрывает их. Это явление навело на мысль о возможности консервировать продукты, подвергая их высокому давлению. Опыты показали, что, действительно, молоко, подвергнутое высокому давлению, долго не скисает, так как в нем уже нет живых бактерий молочнокислого брожения. Давление убивает также ряд болезнетворных бактерий и вирусов.

## ПЛАСТИЧНЫЙ МРАМОР

Давление изменяет свойства конструкционных материалов. Сталь, подвергнутая давлению в 25 тыс. *атм*, становится прочнее и более вязкой; хрупкий мрамор становится пластичным: его можно растягивать, как медь, и сжимать.

Прочность различных веществ, с которой мы имеем дело в жизни, значительно меньше той, которая должна быть, если ее рассчитать, исходя из величины межатомных сил, действующих в кристаллической решетке. Такое несоответствие объясняют тем, что в решетке обычно нарушен порядок. Представьте себе кирпичную кладку с шахматным порядком. Если некоторые из кирпичей пропущены или спутаны ряды, то кладка менее прочна, чем правильная.

Предполагают, что если металл кристаллизовать из расплава под высоким давлением, то можно получить правильную кристаллическую решетку, без дефектов, и тогда прочность металла будет значительно выше. Более прочный металл даст возможность построить аппараты, которые выдержат еще большее давление.

## НАУКА О ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Исследование веществ при высоких давлениях — увлекательная область науки. Давление вызывает в веществах удивительные изменения. Многие вещества, проявляющие себя в нормальных условиях как изоляторы, при высоком давлении превращаются в полупроводники, а полупроводники могут приобрести свойства металлов. Теоретические расчеты показывают, что под давлением в 2 млн. *атм* твердый водород перейдет в металлическое состояние.

После того как давление снято, вещество обычно возвращается к своей первоначальной структуре. Но иногда оно остается в новом состоянии. Мы подробно рассказали о том, как переходит графит в алмаз, а нитрид бора в боразон. При давлении в 160 тыс. *атм* и температуре 1200—1400°Ц в новую модификацию переходит и кварц — он становится вдвое плотнее обычного.

Кварц такой структуры в естественном состоянии на Земле не существует. Но частицы именно такого кварца найдены в крупнейшем метеоритном кратере в штате Аризона (США). Следовательно, в лаборатории сумели изготовить космический минерал! Этот минерал назван стиповеритом по имени синтезировавших его ученых Стишова, Поповой и Верещагина.

Исследования при высоких давлениях ценны не только для науки, у них большое практическое значение. Синтетические алмаз и боразон — превосходные материалы для режущих и шлифовальных инструментов. Искусственный кварц применяется в радиотехнике.

Превращения и новые качества, которые проявляются в веществах под действием высокого давления, изучены сравнительно слабо.

Мы стоим у порога давлений в миллионы атмосфер. Восхождение к вершинам давления продолжается и сулит науке и технике много новых открытий.

■

# НАУКА, НЕОБХОДИМАЯ ВСЕМ

### (Термодинамика)

Термодинамика — удивительная наука.

Физик, мечтающий, например, овладеть неисчерпаемым источником энергии — осуществить каким-либо путем термоядерную реакцию, прежде чем начать рассчитывать свою сложнейшую установку, спрашивает у термодинамики, возможен ли задуманный им новый физический процесс в области плазменных превращений, и только получив утвердительный ответ, предпринимает долгий и трудный поиск. Ученый уверен, что, несмотря на возможные, пока еще непреодолимые трудности, его работа может увенчаться успехом.

Если химик старается найти пути, как полу-

чить новое, небывалое в природе, задуманное им вещество, которое, как он надеется, должно обладать замечательными свойствами, очень нужными людям, то он тоже прежде всего обратится за советом к термодинамике: можно ли вообще осуществить задуманную им новую реакцию, с помощью которой он рассчитывает получить такое вещество. Если термодинамика даст отрицательный ответ, химик и пытаться не будет осуществлять эту реакцию. Работа в этом направлении не будет успешной: оно безнадежно.

Геолог, изучающий новое рудное, солевое месторождение, советуется с термодинамикой: какие минералы он может в нем найти и в какой последовательности они в этом месторождении могут залегать.

Биологу термодинамика помогает разобраться в бесконечной сложности жизненных процессов, протекающих в живой клетке.

Синоптик, предсказывающий погоду, следящий за движением циклонов, за зарождением ураганов и бурь в океане и в воздухе, использует в своей работе строгие законы термодинамики.

Астрофизик наших дней начинает неплохо разбираться в чудовищной, еще совсем недавно казавшейся совершенно недоступной загадочности явлений в недрах далеких миров, внутри звезд, отстоящих от нас на сотни и тысячи световых лет. Пожалуй, теперь ученые знают глубины звезд лучше, чем даже неглубокие недра земного шара, которые лежат всего в каких-нибудь десятках километров под нашими ногами. В этом ученым тоже помогла термодинамика.

Инженер, задумавший построить новый двигатель, прежде подсчитает с помощью термодинамики, какова может быть его эффективность и будет ли он более выгодным, чем существующие. От ответа термодинамики будет зависеть решение — стоит ли над новой машиной работать.

Термодинамика указала пути, как создавать новые высокоэкономичные машины, и вот старые паровозы, сотню лет честно трудившиеся, начинают исчезать с железных дорог. Водить поезда стали мощные тепловозы, а они созданы и построены на основе термодинамических расчетов.

Термодинамика научила химиков, как использовать неисчерпаемые в воздушном бассейне земного шара запасы азота. Во всех странах мира работают теперь гигантские азотно-туковые химические комбинаты, которые извлекают азот из воздуха и превращают его в удобрения, повышающие урожаи полей. Трудно себе представить, что бы было, если бы проблема синтеза азотных удобрений не была решена.

Термодинамика помогла найти решение и в сказочной, поистине фантастической проблеме — в синтезе искусственных алмазов. То, что в природе рождалось в течение миллионов лет в неведомые геологические эпохи в неведомых глубинах, теперь создается в сверхпрочных аппаратах химиков под давлением в сотню тысяч атмосфер при температуре в 2000°. Условия реакции, температуру и давление, указала химикам термодинамика.

Термодинамика — замечательная наука. Она необходима всем. Ни один ученый не может обойтись без нее в своей работе. Законы термодинамики незыблемы и всеобщи, они лежат в основе всех отраслей знания, изучающих все, что существует и развивается в окружающем нас мире.

## ЧТО ТАКОЕ ТЕРМОДИНАМИКА

Точное определение той науки, которая называется термодинамикой, может показаться сухим, малоинтересным, узким и скучным. Термодинамика в своей основе — наука о температуре, теплоте и превращениях теплоты и работы друг в друга.

Свое название эта наука получила от двух греческих слов: «терме» и «динамис». Первое слово означает «теплота». Вторым словом раньше выражали различные понятия: силу и работу.

### Что в мире подлежит изучению методами термодинамики?

На этот вопрос нелегко ответить. Все области знания, в которых успешно используются термодинамические методы исследования, перечислить просто невозможно. Как бы сложно ни было изучаемое явление, к какой бы отрасли познания оно ни относилось: к любому ли разделу физики — от астрофизики до теплофизики или электроники, к любой ли отрасли химии — от технической химии до сложнейших биохимических процессов — всюду и всегда наиболее важным, существенным, основным будет переход, превращение одного вида энергии в другой вид.

### Место термодинамики среди других наук

Термодинамика своеобразна. Она многим отличается от других научных дисциплин, изучающих окружающий нас мир. Основанная на простых наблюдениях, на несложных опытах, она развилась в удивительно стройную науку, в основе которой лежит небольшое число основных законов.

Путем строгих логических заключений, методами чисто математических выводов термодинамика устанавливает связь между самыми разнообразными свойствами вещества, позволяет на основании изучения одних, легко измеряемых величин вычислять другие, важные и необходимые, но трудно измеримые или даже недоступные непосредственному измерению. Термодинамика, конечно, может быть по праву отнесена к физическим наукам, но в ней существуют разделы: химическая термодинамика и техническая термодинамика. Это большие самостоятельные дисциплины.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

### Системы, которые исследует термодинамика

Мир, в котором мы живем, полон тайн. Он неисчерпаем и безграничен. Как бы ни были велики успехи и достижения наук, изучающих Вселенную, и в большом и в малом, от необъятности Метагалактики до неуловимого нейтрино, все равно, чем больше наука познает мир, тем все шире раздвигается перед нею неизведанное.

Каждая наука, и термодинамика также, изучает свои определенные области, ограничивая их, и выделяя из необозримой сложности и многообразия всей совокупности бесчисленных процессов, протекающих в действительности. Этим упрощается задача познания неизвестного. Иначе ни одна наука не могла бы работать.

Термодинамика изучает состояния с и с т е м ы — некоторого определенного количества вещества. Что такое термодинамическая система? Каковы ее свойства? Что называется с о с т о я н и е м системы? Ответить на эти вопросы лучше всего конкретными примерами. Для термодинамика, изучающего химические реакции, системой будет та смесь многих реагирующих веществ в его приборе, где и протекают сложные химические превращения. Ученый-астрофизик назовет системой внутренность гигантской звезды того класса, который он изучает. Залив моря, где происходят кристаллизация и выделение солей из морской воды,— это тоже система для ученых, изучающих с точки зрения термодинамики солевые равновесия.

Перегретый пар под поршнем паровоза, взрывчатая газовая смесь паров горючего с воздухом в цилиндре двигателя автомашины, пары сверхвысокого давления в котлах тепловой электростанции — все это различные системы, свойства и состояния которых изучаются термодинамикой.

Не следует думать, что системы, которые ученые изучают методами термодинамики, обязательно должны быть ограничены реальными твердыми стенками: например, бронированными стенками колонн, в которых проводится синтез при высоком давлении на химическом заводе, стенками стеклянной колбы в лаборатории химика, стальным цилиндром в двигателе паровой машины.

Исследователь может выделить изучаемую им систему воображаемыми мысленно границами: он может рассматривать образование облака в атмосфере, процессы, происходящие в живой клетке организма, состояние вещества внутри звезды, следить за процессами, протекающими в реакторных трубах сложнейшего химического производства.

### Система не может быть бесконечной

Термодинамика может изучать любые системы, но одно условие обязательно: система должна быть конечной. Она может быть ничтожно малой, такой, как, например, живая клетка, может быть гигантски большой, как звезда. Но система, изучаемая термодинамикой, не может быть бесконечной. Это очень важно. Поэтому выводы термодинамики не применимы ко Вселенной в целом.

Ее законы нельзя распространять не только на всю бесконечную Вселенную, но даже и на значительные области Вселенной, поскольку процессы в них в сильной степени определяются полями тяготения.

Размеры систем, для которых применимы законы термодинамики, не могут быть и очень малыми. Эти законы утрачивают смысл для систем, состоящих всего из нескольких молекул.

## Состояние и свойства системы

Состояние системы определяется температурой, давлением и объемом. Эти свойства системы хорошо всем знакомы, но они далеко не простые. Состояние одного моля водорода, килограмма водяного пара, кубометра любого газа, воды, любой жидкости, кристалла, самой сложной смеси реагирующих веществ полностью характеризуется соответствующими значениями свойств системы. Иногда ученому-термодинамику приходится принимать во внимание, учитывать и внешние воздействия на систему, от которых может зависеть ее состояние: силу тяжести (например, при изучении свободной атмосферы), электрические или магнитные поля.

Состояние системы — это совокупность ее свойств. Изменилось состояние системы — изменились и значения ее свойств. Восстановилось снова прежнее состояние — восстановились прежние значения ее свойств. На настоящем состоянии системы ее прошлые состояния не отражаются. Вода остается той же самой водой, если ее заморозить, а потом растопить лед или сначала испарить, а потом сконденсировать пар. Изменение свойства не зависит от пути перехода системы из начального состояния в конечное. Очень важно, что справедливо и обратное утверждение: если при переходе системы из одного состояния в другое изменение некоторой величины не зависит от пути перехода, а определяется только начальным и конечным состояниями системы, то эта величина — свойство системы.

Вероятно, у многих может возникнуть вопрос: зачем нужно говорить о простых вещах так неопределенно, туманно и неясно. Если ученый изучает воду, так пусть он ее водой и называет; если серную кислоту, пусть так и говорит — кислота. Так, казалось бы, должно быть яснее и проще.

Дело в том, что термодинамика очень экономная наука. Если термодинамика дает уравнение для расчета химической реакции, то оно справедливо не только для какой-нибудь одной реакции, но и для всех химических реакций, где бы они ни протекали, кем бы ни проводились, при каких бы условиях ни осуществлялись и какие бы вещества в этих реакциях ни принимали участие. Непреложные термодинамические законы о работе тепловых машин применимы ко всем тепловым двигателям, как бы они ни были построены, на каком бы принципе они ни работали, даже и к тем тепловым машинам которые когда-нибудь будут изобретены. Вот поэтому так гораздо правильнее и точнее выражается эта замечательная особенность термодинамики: она изучает состояния и свойства термодинамической системы вообще, любой, какой угодно.

## Уравнение состояния

И химику, и теплотехнику, и физику, и конструктору новых космических кораблей мало знать общие закономерности поведения системы вообще. Им нужно рассчитывать совершенно конкретные задачи: один хочет знать, с помощью какой химической реакции он сможет получить новое соединение дешевле и проще; другому необходимо еще более повысить коэффициент полезного действия у двигателя; физик, например, мечтает достичь настолько высоких температур, чтобы можно было осуществить начало термоядерной реакции; космонавтам необходимы еще более тяжелые космические корабли, и им нужно новое топливо, еще более мощное и с большим тяговым усилием.

Это примеры очень важных, имеющих огромное значение процессов, в них принимают участие определенные реальные вещества. И свойства этих веществ должны входить в термодинамические расчеты.

Для этого нужно знать уравнение состояния вещества. Его нельзя получить при помощи термодинамики. Оно должно быть найдено другим, независимым путем — либо точными измерениями, либо теоретически.

Уравнение состояния необходимо термодинамике знать заранее, без него она ничего не может рассчитать. Оно позволяет рассчитать для определенного вещества любую из четырех важнейших величин—количество вещества ($m$), его объем ($v$), давление ($p$) или температуру ($T$), если известны три остальные величины:

$$F(m, v, p, T) = 0.$$

Удобнее рассматривать всегда один моль газа, тогда уравнение состояния будет проще:

$$F(v, p, T) = 0.$$

Каждый школьник знает уравнение состояния идеальных газов, его вывел впервые петербургский профессор француз Клапейрон:

$$pv - RT = 0.$$

Это уравнение хорошо описывает поведение одного грамм-моля любого газа при малых давлениях и высоких температурах. Оно очень простое, что сильно облегчает расчеты, и достаточно точное, поэтому его очень часто применяют. Этому замечательному уравнению подчиняются и воздух, которым мы дышим, и раскаленные газы в топках, и плазма внутри звезды, и даже электроны в металле. Выведено оно при допущении, что молекулы газа представляют собой материальные точки: обладают массой, но не имеют объема и никак не взаимодействуют между собою. Поэтому оно и названо **уравнением состояния идеальных газов.**

Такое допущение определяет область, в которой применяется это уравнение: при низком давлении газ занимает настолько большой объем, что объемом самих молекул можно смело пренебречь, а при высокой температуре молекулы обладают такой большой энергией и такой большой скоростью, что взаимное притяжение не влияет на их движение.

Конечно, в действительности нельзя пренебрегать ни собственными размерами молекул, ни их взаимным притяжением. Истинный свободный объем, в котором могут двигаться молекулы, будет меньше объема самого газа, так как часть этого объема занимают сами молекулы ($v-b$), а давление, под которым находится газ, несколько больше внешнего давления, потому что из-за межмолекулярного притяжения газ испытывает как бы дополнительное сжатие:

$$p + \frac{a}{v^2}.$$

Поправка к давлению должна быть тем больше, чем ближе друг к другу находятся молекулы в газе, чем более он сжат, чем меньший объем занимает. Эта поправка обратно пропорциональна квадрату объема: чем он меньше, тем ближе друг к другу молекулы и тем больше притяжение, а кроме того, самих молекул в единице объема больше.

Эти поправки ввел в уравнение идеального газа голландский ученый Ван-дер-Ваальс. Он предложил уравнение

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)\cdot(v - b) - RT = 0,$$

которое называется его именем или **уравнением реальных газов.** $R$ здесь постоянная, которая зависит от количества газа. Это уравнение гораздо более точно, чем уравнение Клапейрона,

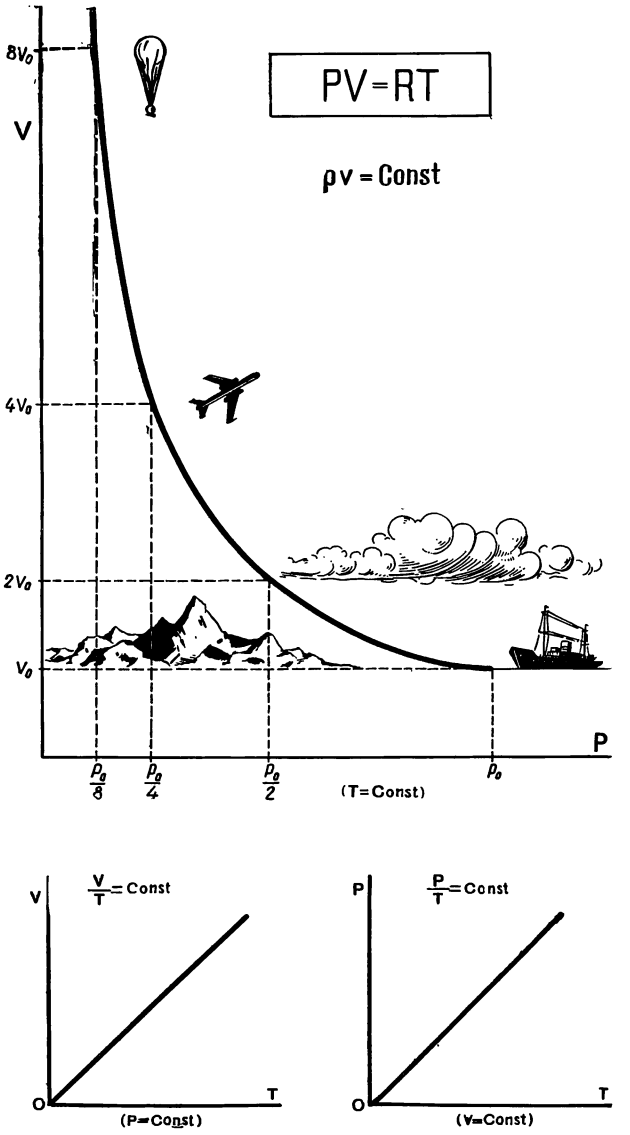



**Рис. 1. Графики уравнения состояния идеального газа. На верхнем изображена зависимость объема от давления при постоянной температуре. *Внизу* — графики зависимостей изменения объема и давления от температуры. Этому уравнению подчиняется и воздух, только, конечно, нужно учитывать изменение температуры с высотой.**

и применимо в значительно более широких пределах при изменении температуры и давления. Поправки «$a$» и «$b$» определяются из опытных данных. Изучив отклонения от идеального газа в изменении объема газа при сжатии, можно даже довольно точно оценить размеры его молекул.

Знать уравнение состояния очень важно для термодинамики, без него она бессильна

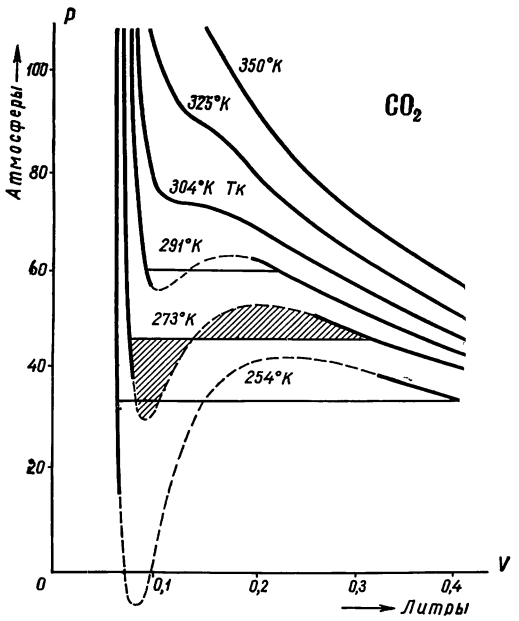



**Рис. 2. График уравнения состояния реального газа. Кривые на графике передают зависимость между объемом и давлением для углекислого газа при разных температурах. При высоких температурах это уравнение переходит в уравнение идеального газа. Ниже критической температуры (304°К) это уравнение передает сосуществование газа и жидкости. Правая ветвь каждой кривой соответствует газообразной углекислоте, левая — жидкой. Горизонтальный участок — смеси пара и жидкости. Нанесенные пунктиром части кривых нереализуемы; они соответствуют нестабильным состояниям. Небольшие отрезки над горизонтальной прямой и под ней соответствуют переохлажденному пару и перегретой жидкости.**

при всем своем могуществе. Кроме двух приведенных уравнений состояния, были предложены десятки, а может быть, даже и сотни различных форм уравнений состояния, описывающих поведение различных веществ с возможно большей степенью точности. Многие из них по необходимости весьма сложны, и рассчитывать по ним очень трудно и утомительно. В таких случаях приходится составлять с помощью этих уравнений числовые таблицы, чтобы облегчить практические расчеты.

Таким образом, в совокупности свойств, характеризующих состояние системы, нельзя **произвольно** менять значения **всех** свойств. Эти значения связаны между собой уравнением. Уравнение состояния обязательно нужно знать, только при этом условии возможно успешно использовать замечательный математический аппарат термодинамики.

## Процесс

Изменение состояния системы называется п р о ц е с с о м. Это очень широкое и очень важное понятие. В теплое утро влажный воздух над озером, нагретый лучами солнца, высоко поднялся над землей и, расширившись, охладился; влага, находившаяся в нем, начала конденсироваться — мы наблюдаем процесс образования облака. В печи весело потрески-

$$PV-RT\left\{1+\frac{1}{V}\left[\frac{a}{RT}-b+\frac{c_1 N}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}}e^{\frac{T_к}{T}}\right]+\frac{1}{V^2}\left\{\frac{bc_1 N}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}}e^{\frac{T_к}{T}}-4\left(1-\frac{4c_2/c_1}{T^{\frac{3m_2-4m_1}{2}}}\right)\left(\frac{c_1 N}{T^{\frac{3+2m_1}{2}}}e^{\frac{T_к}{T}}\right)^2\right)\right\}=0$$

**Рис. 3. Уравнение состояния водяного пара; $R$ — постоянная из уравнения идеальных газов; величины $a$ и $b$ взяты из уравнения Ван-дер-Ваальса. Величины $c_1$, $c_2$, $m_1$ и $m_2$ рассчитываются из опытных данных; $N$ — число молекул в одном грамм-моле. Это уравнение получено советским ученым-термодинамиком Вукаловичем, и по нему составлены самые точные в мире таблицы свойств водяного пара. Этими таблицами пользуются инженеры и конструкторы, когда рассчитывают и создают электростанции, турбины, котельные установки, паровые двигатели.**
**Уравнение состояния очень сложно, и расчеты по нему трудны. Но не следует бояться трудных формул. Природа открывает свои тайны тем храбрецам, которые не испытывают страха перед сложными расчетами.**

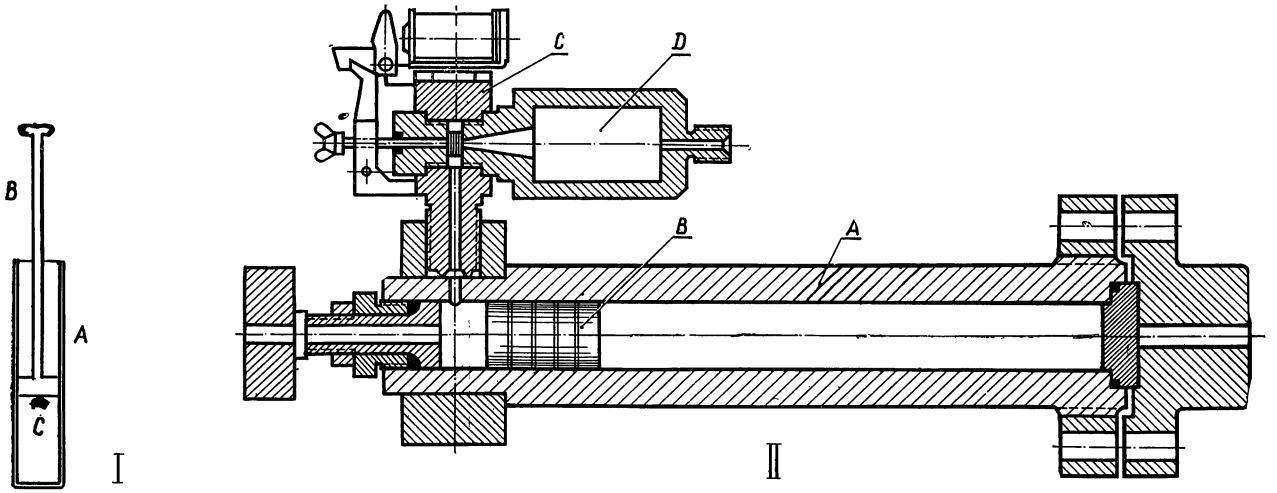



Рис. 4. I. Воздушное «огниво», изобретенное в 1803 г. Трубка *A* закрыта с одного конца и снабжена поршнем *B*. Когда поршень быстро вдавливается, воздух в трубке сильно нагревается. Трут *C* воспламеняется. II. Современное газовое «огниво». В стальной трубке *A* может перемещаться стальной поршень *B*. В трубке находится газ при атмосферном давлении. Когда затвор *C* открывается, сжатый воздух выходит из сосуда *D* и сообщает ускорение поршню *B*. Поршень приобретает скорость в несколько десятков метров в секунду и адиабатически сжимает газ в трубке *A*. В зависимости от давления воздуха в *D* газ в трубке *A* нагревается до 8000—10 000°Ц, и давление его повышается до 7000—10 000 атмосфер.

вают дрова, согревая комнату,— это процесс химической реакции соединения с кислородом. Гигантский взрыв на выброс, за тысячные доли секунды он прокладывает десятки километров нового канала,— это тоже процесс: химическая реакция разложения взрывчатки и последующее расширение образовавшихся при реакции газов. Образование перегретого пара высокого давления в паровом котле, его расширение в турбине, охлаждение в конденсаторе — все это процессы, обеспечивающие работу сверхмощной электростанции.

## Окружающая среда

Системы, которые изучает термодинамика, хотя и содержат определенное и постоянное количество вещества, совсем не изолированы от окружающего мира. Чтобы в реакторе химика могла успешно протекать нужная ему реакция, он должен предусмотреть, каким способом будет нагреваться или, наоборот, охлаждаться реакционный аппарат. Пар, расширяясь в цилиндрах паровоза, движет поршень, это движение передается на колеса, и тяжелый состав отправляется в путь. Воздух, нагретый у земной поверхности лучами солнца, поднявшись вверх, расширяется и раздвигает слои атмосферы на большой высоте, где давление понижено: образуется облако.

Термодинамика изучает процессы, в которых система не обменивается веществом с окружающей средой, но может обмениваться теплотой и работой. Такая система называется **закрытой.** Как предельный случай, система может быть **полностью изолирована** от окружающего мира и не обмениваться с ним ни веществом, ни работой, ни теплотой.

## Наиболее важные процессы

Среди множества разнообразных процессов некоторые, наиболее простые, имеют особо важное значение для термодинамики. Из них здесь необходимо упомянуть два вида термодинамических процессов:

1. Те, которые протекают при постоянной температуре, носят название изотермических. Таких процессов и в природе, и в технике очень много. Изотермически, например, тает лед. Почти все процессы в живом организме протекают при постоянной температуре. Химикам часто удобно осуществлять свои реакции при неизменной температуре.

2. Те процессы, которые протекают без обмена теплом с окружающей средой, называются адиабатическими. Часто адиабатическим путем протекают очень быстрые процессы, когда система **не успевает** обмениться теплом с окружающей средой.

Если вы заставите расшириться газ, помещенный в термос, ему придется расширяться адиабатическим путем. При этом газ охладится. Один французский рабочий-оружейник придумал в 1803 г., когда еще не были изобретены спички, «воздушное огниво» — закрытую с одного конца трубку с поршнем. Очень быстрое и сильное сжатие воздуха в «воздушном огниве» приводит газ в раскаленное состояние, и трут, прикрепленный к поршню, воспламеняется. Это тоже адиабатический процесс.

Конечно, и при изотермических и при адиабатических процессах система взаимодействует с окружающей средой.

При изотермических процессах система, совершая работу или изменяя состояние, поглощает из окружающей среды теплоту — ровно столько теплоты, что температура внутри системы остается постоянной. При адиабатических процессах система взаимодействует с окружающим миром, только совершая работу.

## Температура

Ощущения тепла и прохлады, жары и холода присущи человеку. Лишенный термических ощущений, он не выжил бы в земной обстановке. Однако понятие температура — трудное и тонкое понятие.

Историю термодинамики, собственно говоря, можно начать с изобретения Галилеем в 1592 г. простого устройства — **термоскопа.** Человечество должно быть глубоко благодарно Галилею за его гениальную идею — судить об изменениях температуры по изменениям других свойств тела. Сам Галилей предложил измерять температуру по расширению воздуха. В его первом термоскопе показания искажались изменением барометрического давления. Вскоре был изобретен газовый термоскоп постоянного объема, он оказался значительно более чувствительным и точным.

Рис. 5. Термоскоп Галилея.

Вместо воздуха трубку стали заполнять жидкостью: сначала водой, потом спиртом и, наконец, ртутью. Ртуть оказалась настолько удобной, что один физик XVIII столетия заявил в порыве восторга: «Определенно, природа создала ртуть для изготовления термометров...»

Триста лет назад флорентинские академики открыли, что в смеси воды и льда температура

## Тайна вихря

Страшен смерч в океане. Вихрем до самого неба поднимает воду из морской пучины. Беда, если неосторожный капитан не успеет увести свой корабль с его пути. Еще страшнее смерч в пустыне. Гигантские воздушные вихри несут горы горячего песка, вырывают с корнями деревья, разрушают дома, могут унести из каравана путника вместе с верблюдом. По древней легенде, храбрец, повстречавший в пустыне смерч на своем пути, должен смело к нему подскакать и, не дрогнув, метнуть в него кинжал: смерч исчезнет, а на стальном лезвии останутся капли холодной росы — это «кровь шайтана», пораженного смелым воином. Удивительно, как часто скрывается истина в старых поэтических легендах. Может быть, сотни лет знали жители пустынь о сильном холоде в середине вихревого столба смерча. Но ученые-физики сумели подметить это замечательное явление совсем недавно. Оказывается, во всяком воздушном вихревом движении температура наружных слоев вихря выше, чем в окружающем воздухе, а в центре значительно ниже. И хотя до сих пор теоретики еще не смогли до конца понять и объяснить причину этого эффекта и его механизм далеко не ясен, инженеры заставили «шайтана смерчей пустыни» послушно работать в холодильных установках.

постоянна. Спустя 50 лет стеклодув Фаренгейт установил, что температура кипения воды остается постоянной, если давление не меняется. Эти две постоянные температурные точки дали возможность прокалибровать термоскоп, что и превратило его в **термометр.**

Первое время, чтобы измерять столбик жидкости, расширяющейся при нагревании, делили расстояние между двумя точками — от точки плавления льда до точки кипения воды — на произвольное число равных частей. В 1742 г. Цельсий предложил делить расстояние между этими точками ровно на сто частей, он обозначил температуру плавления льда как **сто градусов,** а температуру кипения воды как **нуль градусов.** Но вскоре эти обозначения поменяли местами. Этой шкалой пользуются уже более 200 лет почти повсюду в мире. Она удобна, проста и практична.

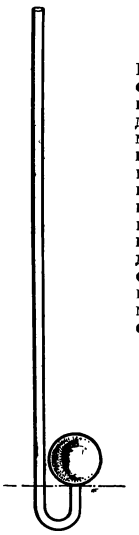


**Рис. 6. Воздушный термоскоп постоянного объема, изобретенный в 1702 г. Воздух в шаре (его диаметр примерно 8 *см*) отсечен от внешнего воздуха ртутью, находящейся в нижней части шара и в узкой трубке (ее диаметр примерно 1 *мм*). Давление в шаре изменялось, когда изменялась температура. Происходило это практически при постоянном объеме воздуха. Современные гелиевые термометры работают тоже при постоянном объеме.**

## Что же показывает термометр?

Кажется, что это всем ясно — температуру! А что такое температура?

Очень хорошо сказал по этому поводу один физик: «Гораздо легче производить измерения, чем точно знать, что измеряется». И почти три сотни лет измеряли повсюду температуру, но только совсем недавно, в конце прошлого столетия, стало окончательно ясно, что такое температура.

А в самом деле, что же показывает термометр? Стоит еще раз проследить, как возникло понятие «температура». Когда-то думали: если становится жарко, то это потому, что в теле повышается содержание **теплорода.** Латинское слово «температура» означало «смесь». Под температурой тела понимали смесь из материи тела и теплорода тела. Затем понятие самого теплорода было отброшено как ошибочное, а слово «температура» осталось.

Добрые две сотни лет в науке сохранялось странное положение: случайно выбранным свойством (расширение) случайно выбранного вещества (ртуть) и шкалы, установленной по случайно выбранным постоянным точкам (плавление льда и кипение воды), измерялась величина (температура), смысл слова «температура», строго говоря, никому не был понятен.

Но ведь термометр все-таки что-то показывает? Если от ответа потребовать необходимую строгость и точность, то на такой во-

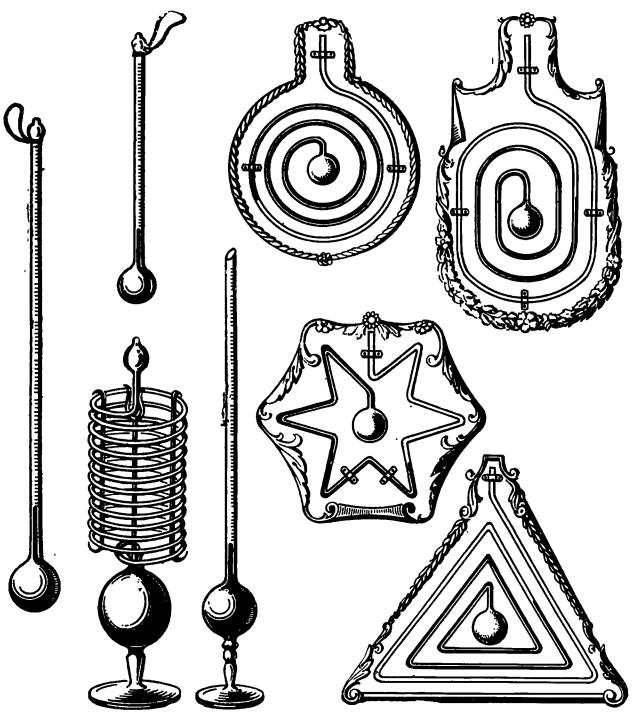


**Рис. 7. Жидкостные термоскопы XVII в. Двести лет назад приборы, отмечавшие изменение температуры, делались красивыми, но форма шарика у резервуара для жидкости была неудачна. Такая форма замедляет наступление термического равновесия между термоскопом и исследуемым телом. При заданном объеме шар из всех геометрических фигур имеет наименьшую поверхность. «Шарик» современных жидкостных термометров — сплющенный вытянутый цилиндр.**

прос придется ответить так: ничего, кроме удлинения в столбике нагретой ртути.

Ну а если ртуть заменить другим веществом: газом или каким-либо твердым телом, которое также расширяется при нагревании, что будет тогда? Что будут показывать построенные на иной основе термометры?

Представим себе, что такие термометры мы сделали. Одни из них мы заполнили ртутью, воздухом, другие изготовили целиком из железа, меди, стекла. Точно установим на каждом из них постоянные точки: в тающем льду 0°, в кипящей воде 100°.

Попробуем теперь измерять температуру. Окажется, что, когда воздушный термометр покажет, например, 300°, другие термометры будут показывать:

ртутный 314,1°,
железный 372,6°,
медный 328,8°,
стеклянный 352,9°.

Какая же из этих «температур» правильна: «воздушная», «ртутная», «железная», «медная» или «стеклянная»? Ведь каждое из испытанных нами веществ показывает свою собственную температуру. Еще интересней повел бы себя «водяной» термометр. В пределах от 0° до 4° Ц он показывал бы при нагревании понижение температуры.

Можно, конечно, попытаться выбрать вместо теплового расширения какое-нибудь другое свойство вещества, изменяющееся при нагревании. Можно, например, построить термометры на основе изменения (при нагревании) упругости пара жидкости (например, спирта), электрического сопротивления (например, платины), термоэлектродвижущей силы (термопара). В наше время такие термометры широко применяются в технике.

При условии предварительной калибровки по двум постоянным точкам такие термометры, например, при 200°Ц будут показывать: спиртовой (по упругости пара) 1320°, платиновый (по сопротивлению) 196°, спай платины и сплава ее с родием (термопара) 222°.

Так какая же из всех этих разных «температур» настоящая? Как и чем нужно измерять температуру?

Прежде чем ответить на эти вопросы, следует уяснить себе самое важное в них — их точное содержание и смысл: **«чем нужно измерять температуру»**. Почему такой «простой» вопрос вообще может возникать?

Чем мы измеряем длину? Метрами. Метр — это длина линейки эталона, который ученые очень бережно хранят, чтобы он не пропал и не испортился. Чем мы измеряем объемы? Можно измерять литрами. Литр — это **объем,** равный одному кубическому дециметру. А чем мы измеряем температуру?

Эти вопросы совершенно сходны, но ответы на них принципиально различны. Если мы сольем в бочку несколько ведер холодной воды, то бочка будет заполнена водой. Сумма объемов воды в ведрах будет равна объему бочки. Но сколько бы холодной воды вы ни влили в бочку, **горячей** воды при этом не получится. Рассуждение это совсем не смешно и не наивно, и факт этот вовсе не очевиден сам собой. Это очень важный закон природы, к которому мы просто привыкли, потому что знаем его из опыта. Из нескольких коротких палок можно составить одну длинную, соединив их между собою встык. Но нельзя сложить температуру раскаленного угля из печи и температуру куска льда. Раскаленный уголь от этого не станет более горячим.

Измерять температуру, подобно тому как измеряют длину, объем, массу, нельзя потому, что температуры **не складываются.** Невозможна такая единица температуры, которой можно непосредственно измерять любую температуру, подобно тому как метром можно измерить любую длину. Объем, длина, масса — примеры **экстенсивных свойств системы.** Если железный стержень разделить на несколько частей, температура каждой из них от этого не изменится. Температура — пример **интенсивных свойств системы.** Непосредственно установить числовое соотношение между различными температурами невозможно и бессмысленно.

Но ведь измерять температуру необходимо. Так как же ее измерять, если ее нельзя измерить методом, пригодным для измерения экстенсивных величин?

Для этого возможен только один путь — использовать объективную связь между температурой и любой экстенсивной величиной: изменением объема, длины, отклонением стрелки гальванометра и т. п.

Поэтому ответ на вопрос — какая из перечисленных выше различных «температур» настоящая — может показаться с первого раза странным: все они равноправны. Любое свойство системы, зависящее от температуры, может быть выбрано для ее характеристики и измерения.

Термодинамика сумела указать способ и вещество, которое позволяет осуществить температурные измерения наиболее целесообразно.

Это — идеальный газ. По его расширению при постоянном давлении или по росту давления при постоянном объеме могут быть проведены наиболее целесообразно измерения температуры. При таком способе измерения бесчисленные выражения для любых закономерностей в природе становятся наиболее простыми.

Но у идеального газа есть один существенный недостаток: такого газа нет в природе.

## Давление

Насколько сложно и трудно понятие о температуре, настолько просто и ясно понятие «давление». Его хорошо знает любой школьник из самого начального учебника физики. Давление — это сила, действующая на единицу площади поверхности. Направлено давление в случае газов и жидкостей всегда перпендикулярно к поверхности. Понятие «давление» можно приложить к твердым телам, но следует помнить, что свойства твердых тел могут зависеть от направления, в котором действует давление (например, пьезоэффект).

В термодинамике давление и температура — два основных, главнейших параметра, определяющих состояние термодинамической системы. Это определение означает, что одно и то же количество вещества при одних и тех же значениях температуры и давления занимает всегда один и тот же объем. Правда, необходимо добавить: это определение справедливо, когда в системе достигнуто равновесное состояние.

Химику очень полезно знать, что один грамм-моль любого газа при 0° Ц и при давлении в 1 *атм* занимает объем, равный приблизительно 22,4 литра. Это стоит запомнить.

## Теплота

Наверное, не одна сотня тысяч лет протекла с тех пор, как наши далекие предки впервые познакомились с огнем и научились сами получать теплоту. Каждый из нас грелся у горячей печки и мерз в стужу. Казалось бы, что может быть теперь привычнее и понятней, чем так хорошо знакомая всем теплота.

Но вопрос — что такое теплота — далеко не так прост. Правильный ответ на него был найден наукой совсем недавно. Долгое время ученые даже не замечали всю сложность этой проблемы.

Первое истолкование природы теплоты было основано на бесспорном и очевидном как будто бы факте: при нагревании тела его температура повышается — следовательно, тело получает теплоту. При остывании, охлаждаясь, тело ее теряет. Поэтому всякое нагретое тело представляет собой смесь того вещества, из которого оно состоит, и тепла. Чем выше температура тела, тем больше в нем примешано теплоты. Теперь уже мало кто помнит, что слово «температура» в переводе с латинского и означает «смесь». Когда-то, например, о бронзе говорили, что она — «температура олова и меди».

Два совершенно различных объяснения, две гипотезы о природе теплоты спорили между собой в науке почти два столетия.

Первую из этих гипотез высказал в 1613 г. великий Галилей. Теплота — это вещество. Оно необычно. Оно способно проникать в любые тела и выходить из них. Тепловое вещество, иначе **теплород**, или **флогистон**, не порождается и не уничтожается, а только перераспределяется между телами. Чем его больше в теле, тем температура тела выше. Еще не так давно говорили — «градус теплоты» (а не температуры), считая, что термометр измеряет крепость смеси из материи и теплорода. (До сих пор еще сохранился обычай мерить в градусах крепость вина — смесь воды и спирта.)

Вторую гипотезу, совершенно, казалось бы, отличную от представления Галилея, высказал в 1620 г. знаменитый философ Бэкон. Он обратил внимание на то, что было издавна известно любому кузнецу: под сильными ударами молота становится горячим холодный кусок железа. Известен способ получения огня трением. Значит, ударами и трением можно произвести теплоту, не получая ее от уже нагретого тела. Бэкон из этого заключил, что теплота есть внутреннее движение мельчайших частиц тела и температура тела определяется скоростью движения частиц в нем. Эта теория получила в науке название **механической теории теплоты.** Для ее обоснования и развития очень много сделал гениальный Ломоносов.

При коренном расхождении обе гипотезы имеют немало сходства: из теории теплорода следовало, что термометр измеряет **количество** теплорода, содержащегося в теле, согласно же механической теории тепла, термометр показывает **количество** движения, содержащегося в теле. Согласно обеим теориям, должен существовать абсолютный нуль температуры. Он будет достигнут тогда, когда, по теории тепло-

рода, от тела будет отнят **весь** теплород, а по механической теории — когда тело потеряет **все** содержащееся в нем движение.

Теория теплорода почти два века господствовала в науке. Она проста и наглядна. Но она ошибочна. Точное взвешивание тел при разных температурах показало, что теплота невесома. Невесомость теплоты хорошо согласовывалась с механической теорией тепла. Тогда думали, что движение никоим образом не может повлиять на вес тела. Правда, теперь мы знаем, что это не точно. Энергия, согласно закону Эйнштейна, должна обладать массой и, следовательно, тоже «весит»; только соответствующая прибавка в весе лежит далеко за пределами даже современной точности взвешивания.

Не следует смешивать теплоту с тепловой энергией тела. Тепловая энергия тела определяется кинетической энергией движения его молекул. Но теплота (это очень важно) далеко не равна тепловой энергии. И еще более важно, что теплота вообще не содержится в теле. Теплоты от дров, горящих в печи, в дровах вообще не было. Теплота только поступает в тело или уходит из него.

Совсем не трудно подсчитать количество энергии хаотического теплового движения в системе, состоящей из молекул перегретого водяного пара,— это и будет его тепловая энергия. Но количество теплоты, которое может выделиться из этой системы при ее охлаждении, совсем не равно тепловой энергии: сначала охладится пар, потом он начнет конденсироваться в жидкую воду, затем охладится вода и, наконец, вода замерзнет. Теплота же испарения воды и теплота плавления льда очень велики. От перегретого пара, таким образом, можно получить гораздо больше теплоты, чем в нем содержится тепловой энергии.

Поэтому, строго говоря, обе гипотезы не верны — ни представление о теплоте как о тепловом веществе, ни механическая теория тепла. Вторая из них подтверждена опытом, но она не имеет никакого отношения к теплоте и касается только тепловой энергии, а это не одно и то же.

## Работа

Совершать механическую работу — это значит преодолевать или уничтожать сопротивления: молекулярные силы, силу пружины, силу тяжести, инерцию материи и т. д. Истирать, шлифовать тело, разделять его на части, поднимать грузы, тянуть по дороге повозку, по рельсам — поезд, сжимать пружину — все это значит совершать работу; это значит преодолевать в течение некоторого времени сопротивление. Совершать работу — это значит преодолевать сопротивление газа, жидкости, твердого тела, кристалла. Сжимать газ, жидкость, кристалл — это значит совершать работу.

Одним и тем же именем «работа» названы несходные явления, но за внешними различиями надо видеть общие основные черты. Работа связана с **движением**: груз поднимается, повозка перемещается, поршень скользит в цилиндре двигателя. **Без движения нет работы.**

Работа связана с упорядоченным движением. Весь груз перемещается вверх. Вся повозка движется по дороге в одном направлении. Весь поршень в одном направлении движется в цилиндре. Работа невозможна без двух участников. Для поднятия одного груза должен опуститься другой груз, должна распрямиться пружина, должен расшириться газ. Оба участника движутся упорядоченно. **Работа — это передача упорядоченного движения от одной системы к другой.**

Не следует думать, что работа может быть связана только с механическим движением. Работа может совершаться и при изменении электрического или магнитного поля.

Способность системы совершать работу, конечно, очень важна для термодинамики. Но какую именно работу может совершить система — это для термодинамики несущественно. Как именно данную работу можно рассчитать и как ее измерить, должна сказать другая наука.

Определение механической работы дает **механика.** Это определение знает каждый школьник: работа ($A$) равна произведению силы ($F$) на путь ($l$).

Если же сила непостоянна, то приходится подсчитывать величину работы на каждом достаточно малом участке пути (математики говорят — на бесконечно малом), на котором силу можно считать постоянной

$$dA = F\,dl,$$

и затем просуммировать бесконечно малые значения работы по всему пройденному пути:

$$A = \int_{l_1}^{l_2} F\,dl.$$

Тем, кто еще не отучился пугаться математических формул, полезно запомнить, что знак интеграла $\int$ — это просто вытянутая буква $S$ — начальная в слове «сумма».

В **физической химии** часто рассматриваются процессы, связанные с дроблением вещества в тонкий порошок (в пыль) или с возникновением из пара новой фазы тумана или дыма. При таких процессах возникает огромная новая поверхность множества мельчайших частиц, и на ее образование должна быть затрачена немалая работа. Эту работу нельзя не учитывать. Она равна произведению поверхностного натяжения ($\sigma$) на площадь новой поверхности ($S$):

$$dA = \sigma dS, \text{ следовательно, } A = \int_{S_1}^{S_2} \sigma\, dS.$$

Такая работа затрачивается и при выдувании мыльного пузыря.

**Теплотехника** при подсчете работы любых тепловых машин пользуется величиной работы расширяющегося газа, например водяного пара в цилиндре паровоза или в турбине. Этот очень важный вид работы измеряется произведением давления газа на изменение его объема:

$$dA = p\, dv; \quad A = \int_{v_1}^{v_2} p\, dv.$$

**Электрохимия**, например, знает другой вид работы. Электрическая работа аккумулятора или гальванического элемента равна произведению электродвижущей силы ($E$) на изменение заряда ($q$):

$$dA = E\, dq; \quad A = \int_{q_1}^{q_2} E\, dq.$$

Полезно заметить и запомнить, что все выражения для различного вида работы очень сходны между собой. Любая работа обязательно измеряется произведением двух сомножителей: некоторой обобщенной силы $f$ (это может быть сила всемирного тяготения, сила магнитного или электрического поля, давление, поверхностное натяжение, любые механические силы и т. д.) и величины $a$ — изменения соответствующего параметра системы (пройденный путь, электрические заряды, величина поверхности, объем и т. д.):

$$A = \int f\, da.$$

В задачи термодинамики не входит изучать различие между разными видами работы. Об этом должны позаботиться другие науки. Различных работ может быть очень много. Теплота только одна.

## Теплота и работа

Нам нужно, чтобы машины для нас пахали землю, собирали урожай, мололи зерно, чтобы нас возили поезда и автомобили, чтобы по воздуху мчались самолеты, чтобы межпланетные корабли взлетали в космос, а подводные лодки изучали глубины океанов. Нам нужно, чтобы машины вгрызались в землю и добывали руду и уголь. Нам нужно, чтобы тысячи могучих, верных и послушных слуг **работали** для нас.

К одним из них мы должны подводить провода и направлять в их моторы электрический ток, полученный либо на **тепловой** электростанции, где за счет **теплоты**, выделяющейся при сгорании угля, рождается электроэнергия, либо на гидростанциях, где в турбинах энергия падающей воды, приобретенная ею только от **теплоты** солнечных лучей, превращается в энергию электрического тока. Другие машины нуждаются в топливе и **работают** за счет **теплоты** сгорания бензина, нефти, угля.

В реакторах атомных электростанций, атомного ледокола, атомных подводных кораблей выделяется при ядерном распаде огромное количество **теплоты**, за счет которой и работают их турбины и двигатели. Энергию атома мы пока умеем получать только в виде **теплоты**.

Нам нужна **работа**, а получить ее мы можем только в конечном итоге за счет **теплоты**; в этом можно убедиться, проследив за цепью (иногда очень длинной) взаимных превращений энергии.

В системе (атомном реакторе, в топке и котле паровой машины, в цилиндре автомобильного двигателя) теплоты нет, точно так же в ней нет и работы. Движение не было теплотой, пока оно содержалось в горячем теле, движение не стало теплотой, когда оно вошло в холодное тело и нагрело его. Теплота — это не свойство системы. И о теплоте, и о работе можно говорить только в связи с процессом и во время процесса, совершаемого системой, но не в связи с ее состоянием. Теплота и работа подобны; и та и другая — это передача движения из одной системы в другую. В этом их глубокое сходство.

Различие между ними велико и принципиально. Теплота — это передача хаотического беспорядочного движения молекул. Такая передача происходит всегда только от нагретого тела к холодному. Работа — это передача упорядоченного направленного движения.

Как превратить в упорядоченное возможно большую часть хаотического движения, как

с помощью тепла получить наибольшее количество работы — это важная задача термодинамики.

## Пример расчета очень важной работы

В качестве примера рассчитаем работу изотермического расширения идеального газа. Хотя для этого и придется иметь дело с интегрированием, пугаться не следует. Те из читателей, кто внимательно прочел 2-й том ДЭ, с этой задачей легко справятся.

Работа расширения любого тела, а следовательно, и любого газа при бесконечно малом изменении его объема равна $dA = pdv$. По уравнению идеального газа $pv = RT$ можно определить его давление:

$$p = \frac{RT}{v}.$$

Следовательно, работа расширяющегося идеального газа при бесконечно малом изменении его объема будет равна:

$$dA = RT\,\frac{dv}{v}.$$

И окончательно, работа, затраченная на расширение одного моля идеального газа от малого объема $v_1$ до большого $v_2$:

$$A = RT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v},$$

а это выражение равно:

$$A = RT \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Это одна из наиболее важных формул термодинамики. Области ее применения буквально неисчислимы. Стоит запомнить, что эта формула существует.

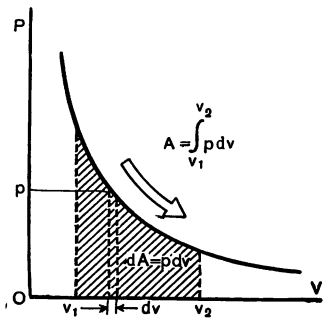



**Рис. 8. График, показывающий работу расширения газа. Эта работа определяется площадью, расположенной под кривой. График показывает изменение давления в зависимости от изменения объема в изучаемом процессе. На рисунке изображена работа, совершаемая газом при изотермическом расширении. Работа обратного процесса — сжатие газа — такая же, но у нее обратный знак. Чтобы сжать газ, нужно совершить над ним работу.**

## Энергия

Повсюду, в любом теле, существующем в мире, при любой температуре, молекулы и атомы находятся в непрерывном движении. Сумма их кинетических энергий определяет тепловую энергию тела. Даже и при абсолютном нуле сохраняется молекулярное колебательное движение. При абсолютном нуле всякое тело поэтому обладает энергией. Она так и называется **нулевой энергией**. Эта энергия очень мала, но пренебрегать ею нельзя: она играет очень важную роль в квантовых расчетах химических равновесий.

Потенциальная энергия взаимодействия атомов в молекулах или в кристаллической решетке тела — это запас его химической энергии. Ее можно определять по-разному. Можно, например, подсчитать энергию, необходимую для того, чтобы разрушить вещество тела на отдельные молекулы, разорвав в нем межмолекулярные связи. Затем, нарушив межатомные химические связи, разделить молекулы на атомы и разбросать все атомы на бесконечно большое расстояние, так чтобы они не взаимодействовали между собой. Только ни один инженер не согласится с таким способом подсчета энергии в топливе. Ему от такого способа, важного и нужного для теоретика, очень мало пользы. Инженер-практик предпочтет просто-напросто сжечь уголь и измерить количество выделившегося тепла.

Физик, подсчитывая энергию тела, задумается о ее запасах, скрытых в атомах, образующих тело. Он получит разные результаты, учитывая либо только энергию ядерного расщепления, либо принципиально возможную, хотя пока еще недостижимую энергию аннигиляции.

Но ведь любое тело, брошенное наклонно вверх, пока летит, обладает, кроме того, собственной кинетической энергией поступательного движения и изменяющейся потенциальной энергией в поле притяжения Земли. Спутник, выведенный на орбиту, сохраняет приданную ему энергию. Упавший камень не остается в покое. Он участвует в сложном движении поверхности земного шара, вращаясь вместе с ним, летит вокруг Солнца, уносится вместе с солнечной системой в галактическом движении, летит вместе с Галактикой в глубину космоса... Каждому движению соответствует своя доля энергии.

Чему же равна энергия тела? Теплотехник не обращает внимания на запасы химической энергии водяного пара. Ведь использо-

вать их он не может, вода в котле остается только водой, хотя и превращается в пар.

Химика не интересует скрытая в атомах ядерная энергия. Ее запасы в исходных веществах и продуктах реакции одни и те же. Атомы до химической реакции и после нее остаются в колбах химика или в его заводских аппаратах теми же самыми атомами. И химикам, и физикам, и инженерам и в голову не придет обращать внимание на движение их реторт, атомных реакторов, тепловых машин вместе с Землей в космосе. Ведь все эти аппараты неподвижны относительно земной поверхности. Но астрофизик, изучающий тайны рождения звезд, уже не может пренебрегать энергией движения исследуемых им тел в космосе.

В составе космических лучей обнаружены частицы, обладающие чудовищной кинетической энергией движения, в миллиарды и более раз превышающей их энергию «покоя».

Несомненно, наука проникнет еще дальше и в глубь атома. Будут открыты новые, еще неизвестные структурные элементы ядерных частиц. Их энергия связи, конечно, будет превышать энергию связи атома. Этот процесс расширения нашего познания никогда не завершится — вещество неисчерпаемо...

Чему же равна энергия тела? Так поставленный вопрос смысла не имеет и термодинамику не интересует.

## Термодинамический цикл

Попробуйте представить себе какую угодно термодинамическую систему. Вообразите себе хотя бы один грамм-моль газа, или десять грамм-молей воды (почти один стакан), или что вам угодно. Чтобы перевести любую систему из одного состояния в другое, с ней нужно

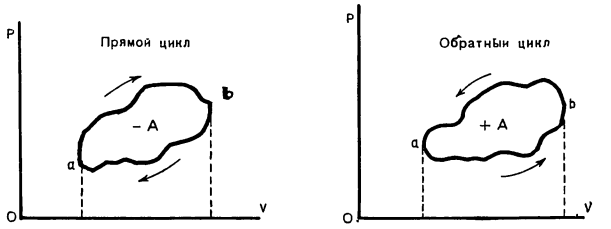



**Рис. 9. Термодинамический цикл может быть каким угодно. Система может любым путем перейти от начального состояния (*а*) в любое другое (*в*) и любым другим путем вернуться точно в исходное состояние. При этом система совершит работу, которая равна площади цикла на графике зависимости между давлением и объемом. Если такой же цикл провести в обратном направлении, то эта площадь будет равна работе, которую придется затратить.**

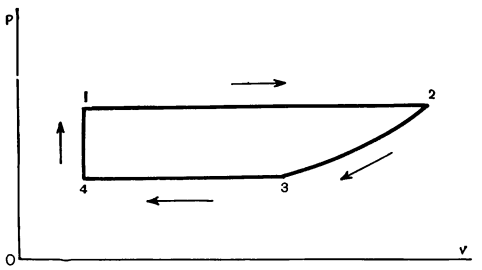



**Рис. 10. Термодинамические циклы совершаются вокруг нас повседневно. Простой цикл, изображенный на этом рисунке, может соответствовать многим различным процессам, протекающим в природе, в лаборатории ученого, на химическом заводе. Например, этот чертеж соответствует и такому циклу изменения состояния воды в природе: *состояние 1* — вода в луже нагрета солнцем, упругость ее пара высока; она начинает постепенно испаряться; объем сильно увеличивается; *состояние 2* — вся вода превратилась в пар; теплый легкий пар постепенно поднимается вверх; температура падает; объем пара уменьшается; *состояние 3* — охлажденный пар высоко над землей; начинается конденсация; появилось облако; пошел дождь; *состояние 4* — весь пар превратился в холодные капли дождя; они падают на землю, где их нагревает солнце; вода возвращается в исходное состояние 1. Цикл завершен и может начаться снова.**

**На рисунке нет ни лужи, ни облаков, ни солнца. Они для термодинамики не важны сами по себе. Термодинамика в каждом процессе выделяет самое главное, что его определяет. Поэтому закономерность, полученная термодинамикой при исследовании одного явления, может объяснить очень много других, даже как будто бы совершенно различных процессов.**

что-то сделать: либо совершить над ней работу, либо, наоборот, предоставить системе произвести работу и при этом либо нагреть систему — передать тепло, либо охладить ее — тепло отнять. Если, нагревая стакан воды, превратить ее в пар, придется не только затратить немало тепла, но и произвести немалую работу. Работу образовавшегося и расширяющегося пара подсчитать нетрудно: он приподнимает весь слой атмосферного воздуха вплоть до границ стратосферы.

Теперь представьте себе, что вы проделали с вашей системой тысячи самых разнообразных операций: вы могли ее охлаждать, нагревать, сжимать, расширять, электризовывать, намагничивать... и можете с ней делать все, что вам угодно. Пусть в ней при этом протекают какие угодно превращения и какие угодно химические реакции, но только при одном условии: пусть после всего этого система вернется точно в свое исходное, первоначальное состояние. Термодинамический процесс, каким бы он сложным ни был, из скольких бы промежуточных стадий ни состоял, в результате которого система возвращается в свое исходное состояние, называется т е р м о д и н а м и ч е с к и м ц и к л о м. Это одно из самых важных понятий термодинамики.

В результате проведенного термодинамического цикла в системе ничего не изменилось:

физическое состояние и строение всех ее частей, движение всех ее молекул — все вернулось к исходному положению и с нашей системой ничего не произошло.

Но ведь в процессе цикла была совершена работа либо самой системой (при расширении пара), либо над системой (при сжатии газа). Сумма всех работ на всех этапах цикла — это и есть **полученная работа.** Кроме того, поглощалась теплота (при испарении воды) или она выделялась (при конденсации пара). Сумма всей теплоты на всех этапах цикла — это **поглощенная** системой **теплота.**

Что же все-таки в итоге цикла произошло? Куда исчезла теплота? Откуда взялась работа?

## ЗАКОН ТЕРМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

Закон термического равновесия основан на опыте. Открытие его не связано с именами выдающихся исследователей и с определенной датой. Он был установлен еще до того, как было завершено создание термометра.

«Применение термоскопов научило нас следующему: пусть 1000 и более различных родов материи — металлы, камни, соли, дерево, пробка, перья, шерсть, вода и ряд других жидкостей — имеют вначале различные температуры. Поместим все эти тела в комнату без огня, не освещенную солнцем. Более горячие из этих тел будут охлаждаться, более холодные нагреваться в течение дня или нескольких часов. По окончании этого периода приложим термоскоп последовательно к каждому телу: показания термоскопа для всех тел будут одинаковыми». Так наглядно сформулировал этот закон живший во второй половине XVIII в. исследователь Дж. Блек, которому термодинамика обязана многими крупными открытиями.

Нас не удивляет, когда мы теперь, глядя на термометр, говорим, что у больного повышенная температура. Ведь термометр показывает свою собственную температуру. Ей равна температура тела, с которым термометр находился в термическом равновесии.

«Два тела, находясь в термическом равновесии с третьим телом, находятся в термическом равновесии и между собою. Это вовсе не само собой понятно, но очень замечательно и важно»,— так сказал о законе термического равновесия замечательный физик нашего времени Макс Планк. Таким образом, закон термического равновесия — это эмпирический (опытный) закон. Мало того, этот закон не только не очевидный, сам собою разумеющийся, но и всего лишь приближенный закон.

Теперь, в результате применения теории относительности к термодинамике систем, находящихся в сильных полях тяготения, выяснено, что в таких системах при термическом равновесии температура в разных частях должна быть различной. В центре гигантской звезды, даже если она находится в термическом равновесии, температура должна быть выше, чем на ее поверхности.

Химик и физик, работающие в земных условиях, могут спокойно руководствоваться законом термического равновесия, но астрофизику, изучающему Вселенную, приходится вносить в него существенные поправки.

## ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

В 1807 г. физик Гей-Люссак, изучавший свойства газов, поставил простой опыт. Этому опыту было суждено сыграть особую роль в истории термодинамики. Случилось так, что при этом опыте присутствовали его друзья — два выдающихся исследователя: физик и математик Лаплас и химик Бертолле. Имена этих французских ученых знают теперь все школьники мира.

Давно было известно, что сжатый газ, расширяясь, охлаждается. Правда, никто не знал почему. Гей-Люссак предположил, что это может происходить потому, что теплоемкость газа зависит от его объема. Он решил проверить это и заставил газ расширяться в пусто-

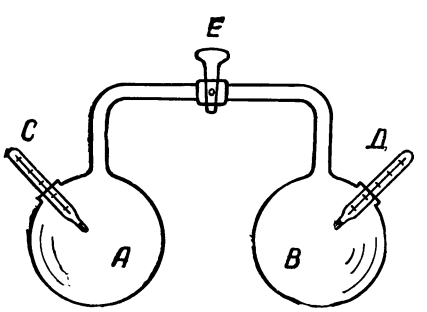



**Рис. 11. Опыт Гей-Люссака. В стеклянном двенадцатилитровом баллоне *A* находился воздух, из такого же баллона *B* воздух выкачан. *C* и *D* — чувствительные термометры. После открытия крана *E* воздух перетекает в баллон *B*, пока в обоих баллонах не устанавливается одинаковое давление. Температура в баллоне *A* понижается ровно на столько, на сколько она повышается в баллоне *B*. Если массы газа, находящиеся в обоих баллонах, смешать, температура расширенного газа будет равна первоначальной температуре газа, имевшего меньший объем.**

ту — в сосуд, воздух из которого был предварительно откачан. К удивлению всех трех ученых, наблюдавших опыт, никакого понижения температуры не произошло, температура всего газа не изменилась. Исследователи не могли объяснить результат: почему один и тот же газ, одинаково сжатый, расширяясь, охлаждается, если его выпускать прямо наружу в атмосферу, и не охлаждается, если его выпускать в пустой сосуд, где давление равно нулю?

Этот опыт был неверно задуман. Полученный результат, как и следовало ожидать, не оправдал предположение ученого, и он не понял смысл опыта. Гей-Люссак и его ученые друзья сделали крупное открытие и не сумели его заметить.

Честь первой точной формулировки одного из величайших законов всего естествознания принадлежит немецкому врачу Роберту Майеру. Работая в тропиках, он заметил, что цвет венозной крови у жителей жаркого климата более яркий и алый, чем темный цвет крови у жителей холодной Европы. Наука движется странными путями, и, казалось бы, что может быть общего между расширением газа в пустоту и различием в цвете крови? Но, однако, гениальный ученый сумел найти единое в несравнимом.

Майер правильно объяснил яркость крови у жителей тропиков: вследствие высокой температуры организму приходится вырабатывать меньше теплоты, ведь в жарком климате люди не зябнут. Поэтому в жарких странах артериальная кровь меньше раскисляется и остается почти такой же алой, когда переходит в вены.

У Майера возникла мысль: не изменится ли количество теплоты, выделяемой организмом, при окислении одного и того же количества пищи, если организм, помимо выделения теплоты, будет еще производить работу? Если количество теплоты не изменяется, то из одного и того же количества пищи можно получить то больше, то меньше тепла, так как работу организма можно снова превратить в тепло, например, путем трения. Если количество теплоты изменяется, то работа и теплота обязаны своим происхождением одному и тому же источнику — окисленной в организме пище, т. е. **работа и теплота могут превращаться одна в другую.**

Эта замечательная идея сразу дала возможность Майеру сделать ясным и загадочный результат в опыте Гей-Люссака: если теплота и работа взаимно превращаются, то при расширении газа в пустоту, когда он не производит никакой работы, так как нет никакой силы (давления), противодействующей увеличению его объема, газ и не должен охлаждаться. Если же при расширении газа ему приходится производить работу против внешнего давления, его температура должна понижаться. Задаром работу получить нельзя! Но если теплота и работа могут превращаться друг в друга, если эти физические величины сходны, то возникает вопрос о соотношении между ними.

Майер первым поставил этот вопрос: «Мы должны узнать, сколько требуется работы для определенного количества теплоты и наоборот». Он очень красиво решил эту важнейшую задачу всей физики.

Давно было известно, что для нагревания газа при постоянном давлении, когда газ расширяется, нужно больше тепла, чем для нагревания газа в замкнутом сосуде, т. е. что теплоемкость газа при постоянном давлении $C_p$ больше, чем при постоянном объеме $C_v$. Эти величины были уже измерены и хорошо известны. Было установлено, что, хотя обе величины $C_p$ и $C_v$ зависят от природы газа, разность между ними почти одинакова для всех газов и равна приблизительно двум малым калориям на один моль любого газа:

$$C_p - C_v = 2\,\frac{г \cdot калория}{моль \cdot 1°Ц}$$

(точно, по современным данным, — 1,987).

Майер понял, что эта разность в теплоте обусловлена тем, что газ, расширяясь, совершает работу.

Работу одного моля расширяющегося газа при нагревании на один градус вычислить нетрудно. Любой газ при малой плотности можно считать идеальным — его уравнение состояния было известно: $pv = RT$. Нагреем этот газ на один градус, при этом он расширится, и при постоянном давлении его объем возрастет на некоторую величину $\Delta v$. Тогда по уравнению состояния

$$p(v + \Delta v) = R(T + 1).$$

Нетрудно найти, что

$$p \cdot \Delta v = R.$$

Это замечательный результат — он объясняет физический смысл газовой постоянной $R$. Она равна работе расширения газа при постоянном давлении, если газ нагревается на один градус.

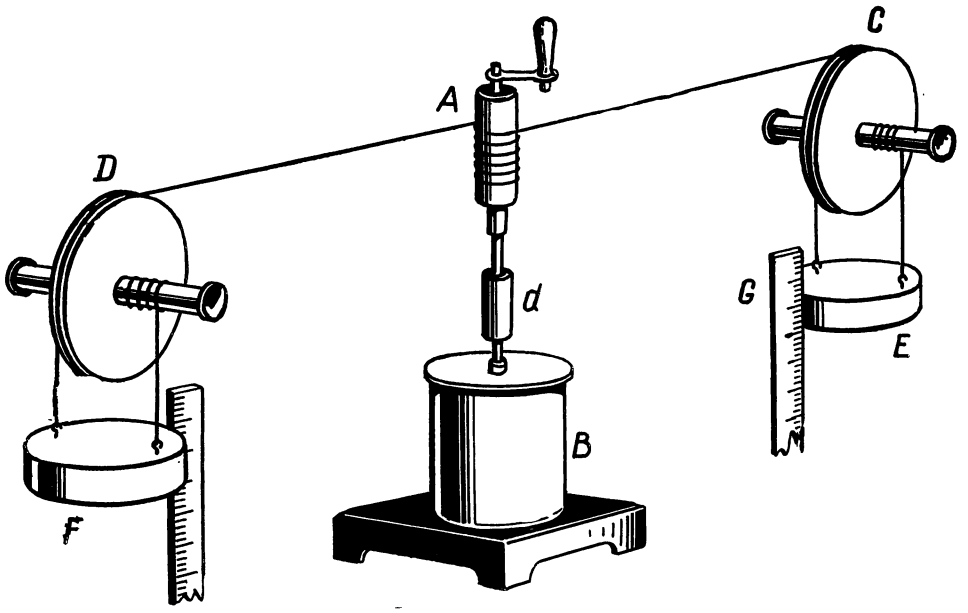



**Рис. 12. Опыт Джоуля. Жидкость в сосуде *B* перемешивается при адиабатических условиях мешалкой *Ad*. Источник работы — грузы *E* и *F*. Грузы, опускаясь, вращают мешалку. Над системой (жидкость, сосуд, мешалка) производится работа. Температура системы поднимается. Чтобы восстановить первоначальную температуру, через стенки сосуда при неподвижной мешалке отбирают теплоту. Ее количество измеряют. Цикл закончен, измерения произведены. Остается вычислить механический эквивалент теплоты.**

Таким образом, Майер нашел, что для любого газа

$$C_p - C_v = R.$$

Это уравнение с тех пор носит его имя.

Было известно, что величина

$$R = 0{,}848 \ \frac{кг \cdot м}{моль \cdot 1°Ц}.$$

Следовательно, 2 малые калории равны 0,848 *кг·м* работы. Нетрудно вычислить, что одна большая калория равна 426,6 *кг·м*.

Это число называют **механическим эквивалентом тепла.**

Замечательный результат Майера был много раз подтвержден прямыми измерениями; особенное значение имели опыты Джоуля, который измерял количество работы, необходимое для нагревания жидкости вращающейся в ней мешалкой. Одновременно измерялись и работа, затраченная на вращение мешалки, и теплота, полученная жидкостью. Как ни менялись условия опыта, брались разные жидкости, разные сосуды и мешалки, результат был один и тот же: всегда из одного и того же количества работы получалось одно и то же количество тепла. Расчеты Майера и опыты Джоуля решили двухвековой спор о природе теплоты.

В наши дни, когда и для теплоты и для работы применяется одна и та же мера, обе эти величины измеряются в джоулях. Доказанный на опыте Майером и Джоулем принцип эквивалентности между теплотой и работой может быть сформулирован очень просто: **во всех случаях, когда из теплоты появляется работа, тратится количество тепла, равное полученной работе, и, наоборот, при затрате работы получается то же количество тепла.**

Этот замечательный вывод был назван **первым законом термодинамики.** Согласно этому закону, **работу можно превратить в теплоту и, наоборот, теплоту — в работу, причем обе эти величины равны друг другу.**

Внимательный читатель, наверное, уже сам заметил, что это, конечно, справедливо только для кругового процесса, когда система совершает цикл и возвращается в исходное состояние. Расчеты Майера и опыты Джоуля касались именно таких термодинамических циклов. В каждом случае при расчете учитывалось, что система (газ, жидкость) должна быть приведена к исходным условиям.

Таким образом, для любого кругового процесса совершенная системой работа $A$ равна полученной системой теплоте $Q$ (если измерять и теплоту и работу в одних и тех же единицах):

$$A = Q, \quad \text{или} \quad Q - A = 0.$$

Это уравнение и выражает первый закон термодинамики: **нельзя осуществить цикл, в котором система произвела бы работу и не получила бы теплоту.**

В качестве примера можно взять любую тепловую машину, все они могут работать только на основе циклов: ведь каждая из них должна работать непрерывно.

## Внутренняя энергия

Система, совершив цикл, восстановила свое исходное состояние. В ней ничего не изменилось — ни вещество, ни движение. Для кругового процесса величина $|Q-A|$ равна нулю. Из этого следует очень важный вывод, и его надо хорошо продумать и усвоить: **для некругового процесса эта величина должна зависеть только от начального и конечного состояний системы, но не от пути перехода.** Это очень важно. Это значит, что существует для каждой термодинамической системы величина, обладающая всеми признаками свойства системы. Это свойство и названо внутренней энергией («энергия» по-гречески — деятельность). Она зависит только от состояния системы. Разность этой величины при переходе системы из одного состояния в другое равна $Q-A$.

Для термодинамики важно и необходимо знать разность значений внутренней энергии при переходе из одного состояния в другое. Эта величина определяется на опыте или расчетным путем по уравнению

$$\Delta E = E_2 - E_1 = Q - A$$

($E$ — обозначение внутренней энергии).

Этим замечательным уравнением выражается **закон сохранения и превращения энергии** в применении к процессам, изучаемым термодинамикой. В него нужно хорошенько вдуматься. Это основное уравнение естествознания. Из него вытекает, например, вся термохимия: если проводить химические реакции без изменения объема, то работа $A=p\Delta v$ будет равна нулю. Тогда тепловой эффект реакции — теплота, поглощаемая или выделяющаяся при химических реакциях, не будет зависеть от промежуточных путей в процессе реакции.

Это и есть известный закон термохимии, открытый петербургским академиком Гессом незадолго до работ Майера.

Открытие первого закона термодинамики — закона сохранения энергии — покончило навеки со страстной мечтой тысяч и тысяч изобретателей: создать **вечный двигатель,** способный работать задаром, без затраты энергии.

Первый закон часто так и формулируют: **вечный двигатель невозможен.**

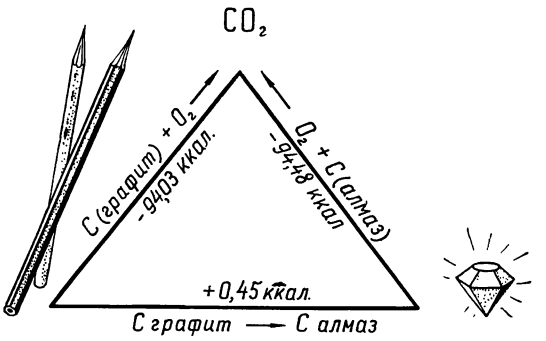



**Рис. 13. Тепловой эффект превращения графита в алмаз. На опыте его измерить нельзя, но легко подсчитать по закону Гесса. Для этого нужно знать, сколько тепла выделяется при окислении одного моля углерода как в виде графита, так и в виде алмаза. Разность между их теплотами горения и равна теплоте превращения графита в алмаз.**

## Единый закон сохранения

Физик наших дней, рассчитывая атомный реактор, конечно, тоже пользуется первым законом, но применяет его уже в новой обобщенной форме. Установленная Эйнштейном эквивалентность массы и энергии связала между собой **закон сохранения вещества** (важнейший закон всей химии) и **закон сохранения энергии** (основной закон классической физики) в единый **закон сохранения — о неизменности суммы массы и энергии.** Ему подчиняются все процессы и явления в микромире атомных ядер и элементарных частиц. И мы теперь знаем, что нагретое тело **тяжелее**, чем когда оно холодное.

История науки полна удивительных предвидений. Михаил Ломоносов еще в 1748 г., почти за сто лет до работы Майера, сумел впервые четко и строго высказать и сформулировать замечательную, фундаментальную мысль о единстве законов сохранения движения и материи. Он писал:

«*...но все изменения, совершающиеся в природе, происходят таким образом, что сколько к чему прибавилось, столько же отнимается у другого. Так, сколько к одному телу прибавилось вещества, столько же отнимется у другого... Этот закон является настолько всеобщим, что простирается и на правила движения: тело, возбуждающее толчком к движению другое, столько же теряет своего движения, сколько отдает от себя этого движения другому телу*».

Для Ломоносова, как и для физика наших дней, великие законы сохранения вещества и сохранения энергии были единым общим законом природы.

## ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Много великих ученых во многих странах пытались разгадать тайну превращения тепла и работы. Поиски закона сохранения продолжались столетиями. Вплотную подошли к закону сохранения, почти открыли его на опыте и... сами не поняли, что сделали, славные французские ученые, о которых была речь выше.

Конечно, честь строгой формулировки и строгого доказательства первого закона принадлежит Майеру и Джоулю. Но многим и многим ученым надлежит воздать честь и принести благодарность за открытие первого закона термодинамики.

Второй великий закон термодинамики связан только с одним именем. Его открыл молодой французский инженер Сади Карно.

Рис. 14. Сади Карно был очень молодым, когда открыл великий второй закон термодинамики.

### Цикл Карно

Молодой инженер Карно рассчитывал и строил водяные двигатели. Но в это же время начали во Франции широко применять паровые машины, и важнейшей научно-технической задачей стало создать теорию тепловых машин.

К решению этой задачи приступил и Карно. Строго говоря, к этому он совсем не был подготовлен. Он еще не мог знать, откуда берется работа в тепловых машинах, не знал, для чего нужна теплота, и считал, как его учили, что теплота — вещество. Но Карно был гениальным исследователем и сумел правильно решить одну из труднейших задач естествознания: при каких обязательных условиях возможно превращение теплоты в работу?

Хорошо знакомый с расчетом водяных двигателей, Карно уподобил теплоту воде. Чтобы водяная мельница могла молоть зерно — работать, необходимо одно условие: вода должна падать с высокого уровня на низкий. Карно предположил: чтобы теплота могла совершать работу, она тоже должна переходить с высокого уровня на низкий, и разность высот для воды соответствует разности температур для теплоты.

В 1824 г. Карно высказал гениальную мысль: **для производства работы в тепловой машине необходима разность температур,** необходимы два источника теплоты с различными температурами. Это утверждение — главное в теории Карно. Оно называется **принципом Карно.**

На основе открытого им принципа Карно придумал цикл идеальной тепловой машины, которую не может превзойти никакая другая машина. Этот цикл изучают теперь все будущие инженеры во всех вузах мира.

Придется его рассмотреть и нам. Такая машина никогда не была построена, ее даже вообще нельзя построить. Но ни одна когда-либо действовавшая машина не имела такого огромного значения для развития техники, как эта придуманная молодым французским инженером и неосуществленная.

В соответствии с принципом Карно мы должны предположить, что располагаем источником теплоты с высокой температурой (нагревателем) и холодильником с низкой температурой. В этом требовании, конечно, ничего необычайного нет: и топка (нагреватель) и холодильник обязательно есть во всякой тепловой машине.

Теперь представим себе цилиндр с поршнем. В цилиндре находится газ. Для расчета удобнее взять один моль идеального газа. (Сам Карно брал для этой цели воздух.) Предоставим инженерам-конструкторам придумывать детали механизма, который позволил бы использовать получаемую работу, и сосредоточим внимание только на самом главном и существенном для всякой машины — на ее рабочем цикле.

Как должна работать идеальная машина? Каким способом нужно нагревать газ, чтобы он, расширившись, мог совершить нужную нам работу?

Если при нагревании газа в цилиндре между нагревателем и газом установится хотя

бы даже очень малая разница температур, то это явно будет невыгодно, ведь, согласно принципу Карно, за счет этой разности можно было бы получить еще дополнительную работу. Значит, газ в цилиндре должен расширяться точно при температуре нагревателя, т. е. расширяться изотермически, сохраняя на протяжении всего пути расширения постоянную температуру.

Мы уже знаем, как протекает процесс изотермического расширения газа. Давление его при этом падает. Сколько при таком расширении будет получено работы, мы тоже знаем.

Газ в цилиндре нагрелся и расширился, но машина должна работать непрерывно. Для этого ее рабочий процесс должен быть обязательно замкнутым — циклическим. Следовательно, нагретый газ должен быть охлажден и сжат.

Как это сделать? У нас в распоряжении есть холодильник с низкой температурой. Казалось бы, можно просто привести цилиндр в соприкосновение с холодильником, и газ охладится. Но тогда возникнет разность температур между горячим еще газом и холодильником, и снова будет потеряна, в соответствии с принципом Карно, возможность получить дополнительную работу. Так делать нельзя. Гениальная идея Карно заключалась в том, что он предоставил газу возможность расширяться без обмена теплом — адиабатическим путем. Согласно первому закону термодинамики, температура газа будет при этом падать. Предоставим ей возможность упасть до температуры холодильника. На этом этапе будет дополнительно получено некоторое количество работы без затраты тепла, только за счет внутренней энергии газа.

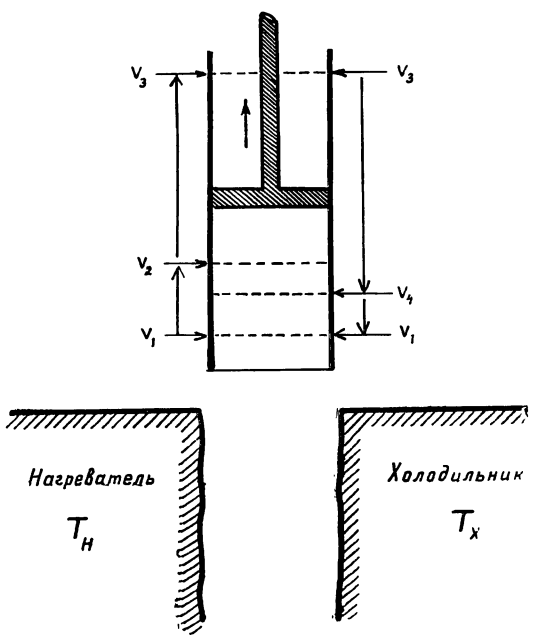



**Рис. 15. Идеальная машина по представлениям Сади Карно. Это простой цилиндр с поршнем. Нижняя стенка цилиндра обладает идеальной теплопроводностью; его можно поставить на горячую поверхность нагревателя (например, заполненного смесью расплавленного и твердого свинца) или на поверхность холодильника (например, со смесью воды и льда). Оба источника теплоты бесконечно велики. Если цилиндр не соприкасается с нагревателем или холодильником, в нем полностью прекращается обмен теплом с окружающей средой.**

Приведем газ в цилиндре в тепловой контакт с холодильником и начнем его сжимать при низкой температуре. Конечно, на основе принципа Карно мы можем это сжатие проводить тоже только изотермическим путем. На этом участке процесса придется затратить на сжатие газа часть той работы, которая была получена при расширении газа. Но это ничего, часть ее останется.

Когда газ достаточно сжат (насколько его нужно сжать изотермически, это нетрудно рассчитать), необходимо повысить его температуру до температуры нагревателя, чтобы можно было начать новый цикл. Газ над поршнем должен занять свой прежний объем. Как это сделать? Нагревать нельзя. Появление разницы температур недопустимо. Оно каждый раз означает потерю возможности получить еще дополнительную работу.

Значит, можно только сжать газ адиабатическим путем, без получения теплоты извне. При таком сжатии возрастет его внутренняя энергия и повысится температура. Когда температура газа достигнет температуры нагревателя, адиабатическое сжатие закончится.

Газ пришел в прежнее состояние, круговой процесс закончен, можно начинать новый цикл. Если верен сам принцип, то лучшую машину построить нельзя. С помощью такой идеальной машины можно получить наибольшее количество работы при заданном перепаде температур между нагревателем и холодильником.

Повторяем: в действительности машина, работающая по циклу Карно, неосуществима.

## Сколько работы можно получить в машине Карно?

Это подсчитать нетрудно. На первом участке цикла идеальный газ совершает работу изотермического расширения:

$$A_н = RT \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

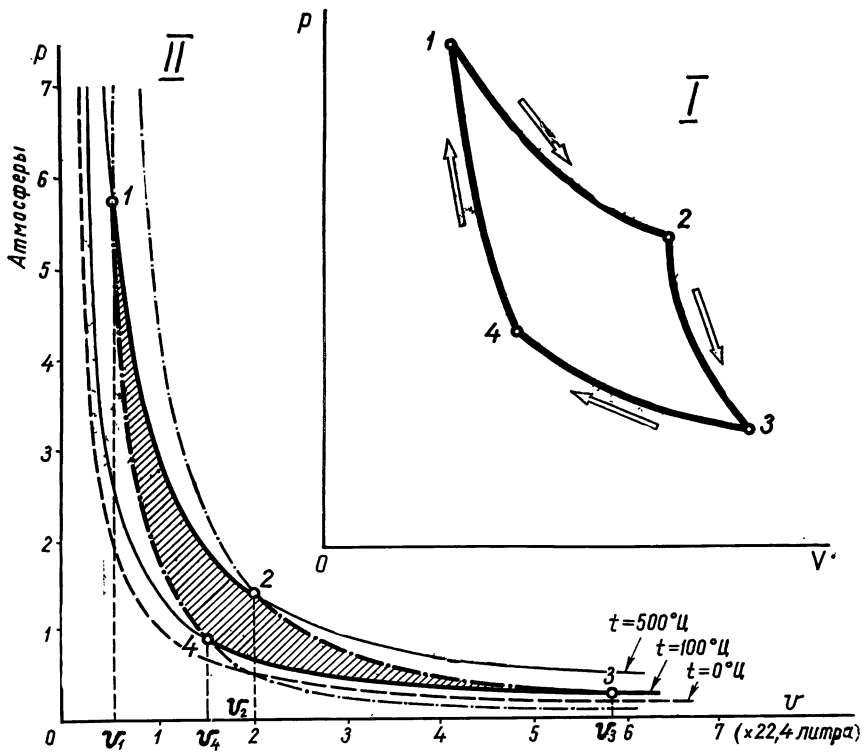



**Рис. 16. Цикл работы идеальной машины Карно. Стенка цилиндра приходит в соприкосновение с нагревателем. Рабочее вещество (у Карно — воздух) начинает изотермически расширяться от начального объема *1* до объема *2*. Поршень поднимается. Нагреватель передает рабочему веществу столько тепла, сколько необходимо для поддержания постоянной температуры. Количество твердого свинца увеличивается, жидкого — уменьшается. Цилиндр снят с нагревателя. Поступление тепла прекращено, но рабочее вещество продолжает расширяться и поршень продолжает подниматься, совершая в адиабатических условиях максимальное количество работы (например, поднимает груз). Температура воздуха падает и достигает температуры холодильника. При этом рабочий газ расширяется до объема *3*. Цилиндр приводится в соприкосновение с холодильником. Воздух изотермически сжимается до объема *4*. Для этого нужно затратить работу. Поршень с грузом опускается. Чтобы температура оставалась постоянной, тепло отводится от рабочего вещества через стенку в холодильник. Часть льда тает — количество воды увеличивается. Снова прекращается контакт цилиндра, теперь уже с холодильником. Источник работы (например, опускающийся груз) сжимает газ адиабатически. Температура его повышается, пока не достигнет температуры нагревателя. Цикл завершен. Количество тепла, полученное цилиндром от нагревателя, больше, чем переданное цилиндром холодильнику. Разность теплоты затрачена на то, чтобы совершить работу. Цикл Карно изображен на чертеже дважды. *I* — так его изображают обычно во всех учебниках и книгах, жертвуя точностью ради наглядности. Чтобы представить себе, как в действительности выглядит график цикла Карно, рядом приведено его точное изображение *II* для одного моля одноатомного идеального газа (гелия) в пределах от $T_х = 100$°Ц до $T_н = 500$° Ц. Этот чертеж стоит внимательно рассмотреть. На нем объемы выражены в молярных объемах, давление — в атмосферах. Нанесены три изотермы: 0° Ц, 100° Ц и 500° Ц. Точно проведены и линии адиабат. Выигрыш работы представлен заштрихованной площадью цикла.**

Внутренняя энергия идеального газа зависит только от температуры, а она не меняется. Следовательно, газ совершает работу только за счет тепла, полученного от нагревателя. И работа равна теплу:

$$Q_н = RT_н \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

При адиабатическом расширении газ работу совершает, а тепла не получает.

При изотермическом сжатии при температуре холодильника над газом приходится совершать работу. На этом участке цикла будет затрачена работа:

$$A_х = RT_х \ln \frac{v_4}{v_3}.$$

При изотермическом сжатии тепло, выделяющееся при постоянной температуре, полностью передается холодильнику, потому что внутренняя энергия газа остается постоянной:

$$A_х = Q_х = RT_х \ln \frac{v_4}{v_3}.$$

На последнем этапе приходится затрачивать работу, но при адиабатическом сжатии газ не выделяет тепло: работа целиком идет на повышение внутренней энергии газа. Сжатие должно продолжаться, пока не будет достигнута исходная температура. Цикл закончен.

От нагревателя машина получила $Q_н$ джоулей тепла. Отдала холодильнику $Q_х$ джоулей. В работу превращено по первому началу термодинамики $Q_н - Q_х$ джоулей. Таким образом, машина смогла превратить в работу не все тепло, полученное от нагревателя, а только часть его:

$$\eta = \frac{Q_н - Q_х}{Q_н}.$$

Эта величина называется в термодинамике **коэффициентом полезного действия машины.**

Мы его можем легко вычислить, если примем во внимание, что, по условиям адиабатического сжатия, объем газа изменяется в одно и то же число раз,

$$\text{т. е. } \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}.$$

Подставляя значения $Q_н$ и $Q_х$, получим после сокращения замечательный результат: коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

Он определяется только температурами нагревателя и холодильника и не зависит больше ни от чего.

Не искушенный в термодинамике читатель должен был прийти в недоумение: где же второй закон термодинамики? В чем же он состоит?

Весь расчет коэффициента полезного действия был проведен, по-видимому, только на основании закона термического равновесия и первого закона. Никаких дополнительных закономерностей как будто бы не понадобилось. Но так только кажется. Новое здесь в требовании располагать по крайней мере двумя источниками теплоты с различными температурами, чтобы привести в действие тепловую машину. Из-за этого требования в работу превращается не все количество теплоты, полученное машиной от нагревателя, и коэффициент полезного действия машины получается меньше единицы. Это новое названо вторым началом термодинамики.

## Второе начало термодинамики

А что будет, если тот же самый цикл Карно, работающий с идеальным газом, провести наоборот? Это сообразить нетрудно. Такая машина заберет тепло от холодильника, превратит полностью в тепло затраченную на осуществление цикла работу и сумму теплоты отдаст нагревателю. Получится холодильная машина.

Представим себе, что у нас две машины. Обе работают по одинаковому циклу Карно, между одними и теми же температурами. У обеих машин и нагреватель и холодильник общие. В одной из них работает идеальный газ, а во второй — любое другое вещество. Будут ли коэффициенты полезного действия этих машин одинаковыми или разными?

Допустим сначала, что коэффициенты полезного действия двух таких машин различны. Все равно у какой машины к.п.д. больше, какая машина лучше — та, в которой работает идеальный газ, или же та, в которой содержится какое-то другое вещество. Проделаем с обеими машинами следующий сложный цикл.

Машину, у которой к.п.д. больше, заставим совершить нормальный цикл. За счет части тепла, взятого от нагревателя, получим работу, а остальную часть тепла отдадим холодильнику. Вторая машина хуже, ее коэффициент полезного действия меньше. Мы получили бы от этой машины за счет такого же количества тепла, взятого от нагревателя, меньше работы и больше тепла передали бы холодильнику. Но мы заставим ее работать в обратном направлении, как холодильную машину. В этом случае она заберет от холодильника больше тепла, чем отдаст ему первая машина, затратит на это меньше работы, чем получено в первой машине, а нагреватель получит обратно ровно столько же тепла, сколько забрала первая машина. И в результате нагреватель останется без изменения.

Теперь соединим обе машины вместе и заставим первую приводить в действие вторую. При этом в нашем распоряжении останется избыток работы. Обе вместе они будут представлять собой такую машину, которая черпает тепло из холодильника и превращает его в работу. Этот результат, конечно, не противоречит первому закону термодинамики. Но если бы это было возможно, мы могли бы построить вечный двигатель, который работал бы вечно за счет неисчерпаемых запасов энергии, скрытых, например, в Ледовитом океане, в воздухе, в любом море — где угодно. Такая машина названа **вечным двигателем второго рода.**

Второй закон термодинамики утверждает, что **вечный двигатель второго рода невозможен.** Такое утверждение, конечно, только пересказ принципа Карно и сведений больше, чем этот принцип, не содержит.

Следовательно, коэффициент полезного действия машины, работающей по циклу Карно, **не может зависеть от вещества, работающего в цикле.** Для тепловой машины, работающей по циклу Карно с любым веществом, максимально возможный коэффициент полезного действия должен быть все равно равен

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

Это поистине удивительное уравнение. Ему **подчиняется вся современная техника.** Из-за него в наше время уходят с железных дорог на слом паровозы. В котле паровоза нельзя нагреть воду до достаточно высокой температуры, и нельзя от сжигаемого топлива получить много работы. Паровозы невыгодны. В двигателях внутреннего сгорания температура в цилиндрах гораздо выше, и поэтому они более экономичны. Это простое и ничем с виду не примечательное уравнение заставляет теплотехников строить котлы на электростанциях с максимально возможным высоким давлением, что само по себе совершенно не необходимо. Нужна высокая температура. Но что поделаешь, если упругость водяного пара очень быстро растет с повышением температуры.

Это уравнение заставляет металлургов вырабатывать сверхпрочные жаростойкие стали, конструкторов — создавать новые много-

ступенчатые турбины сверхвысокого давления, чтобы получать огромную мощность. Химиков оно заставляет разрабатывать для космических ракет новое горючее с максимально высокой температурой горения.

## Почему нельзя построить идеальную машину?

Основным требованием, положенным в основу машины, работающей по циклу Карно, было полное равновесие между нагревателем и газом при расширении, между холодильником и газом при его сжатии. Газ обязательно должен изменять свой объем при постоянной температуре, **точно** равной температуре источника тепла. Но если между ними нет температурной разницы, тепло не может переходить от нагревателя к газу. Если эта разность очень мала, то передача тепла будет очень медленной. При бесконечно малой температурной разности переход будет бесконечно медленным, т. е., попросту, такая машина работать не сможет, потому что те процессы, на которых она основана, практически неосуществимы. Не меньшую трудность представляет требование полного равновесия между нагрузкой на поршень и изотермически изменяющимся давлением газа. Если нагрузка будет больше, газ сожмется, его температура повысится, равновесие будет нарушено — машина перестанет быть идеальной. Зачем же такую невозможную машину придумывать, рассчитывать и обсуждать, если ее все равно нельзя построить?

Идеальная тепловая машина, совершая цикл, крайне близка к состоянию термического равновесия с источниками теплоты и крайне близка к состоянию механического равновесия с источником работы.

Подобные процессы называются **квазистатическими** (как будто бы равновесными). У них есть важная особенность: перемена направления процесса на обратный (расширение газа на сжатие) меняет только знаки у теплоты и работы на обратные. Абсолютные их значения не меняются. Даже мысленно только при квазистатических процессах в цикле мы могли заставить машину Карно работать в обратном направлении с теми же результатами, только обратными по знаку.

Современная термодинамика имеет дело главным образом с такими квазистатическими, внутренне противоречивыми по существу процессами, которые не могут происходить — остаются всегда в равновесии. От этого выводы термодинамики ничего не теряют в своем практическом значении.

Примером может служить ее второй закон.

## «Сколько нужно снежков, чтобы натопить печь?»

Так иронизировал лет двести назад знаменитый философ и естествоиспытатель Дидро. Его насмешливый вопрос по существу совершенно правилен и совсем не бессмыслен.

Отапливать снегом можно, но дорого. Мало того, это постоянно происходит повсюду, где

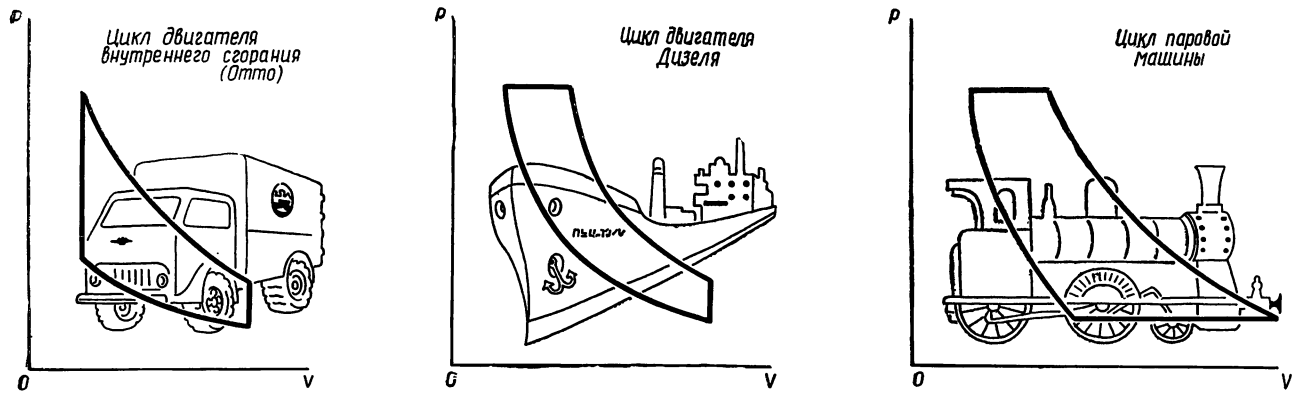



**Рис. 17. Схематизированные изображения циклов в наиболее распространенных двигателях. *Слева* — цикл двигателя внутреннего сгорания (так называемый цикл Отто). Так работают двигатели автомобилей и старых самолетов. *В середине* — цикл двигателя Дизеля. Этот двигатель более экономичен и применяется в машинах с большой мощностью: в тепловозах, судовых двигателях. *Справа* — цикл паровой машины. Этот цикл наименее экономичен. Во всех этих машинах используется адиабатическое расширение рабочего вещества (газа или пара). Оно наиболее выгодно. В двигателях внутреннего сгорания вспышка газовоздушной смеси происходит мгновенно, и объем поршневого пространства не успевает измениться. В двигателе Дизеля топливо подается постепенно, и его горение протекает при постоянном давлении. В паровой машине при постоянном давлении подается пар. Коэффициенты полезного действия всех этих машин, конечно, значительно ниже, чем у идеальной машины Карно.**

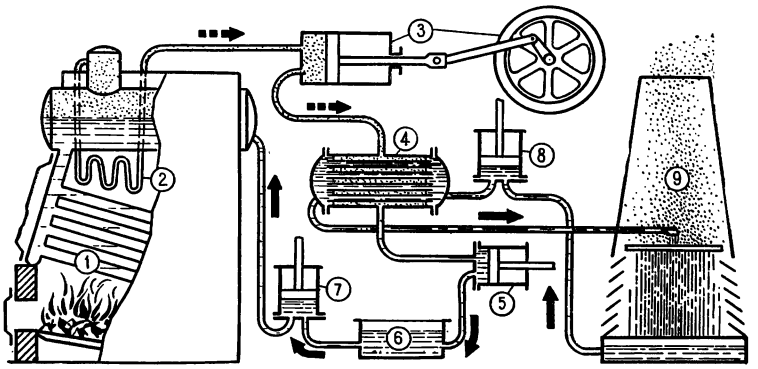



**Рис. 18. Схема теплосиловой установки. Пар получается в паровом котле (*1*) и подается в пароперегреватель (*2*). Отработав в двигателе (*3*), пар идет в конденсатор-холодильник (*4*). Конденсатный насос (*5*) направляет пар в конденсатный бак (*6*), откуда он питательным насосом высокого давления (*7*) подается в котел. Цикл изменений состояния рабочего тела завершен. Источником охлаждения служит вода, прогоняемая циркуляционным насосом (*8*) через трубки конденсатора-холодильника. В охлаждающем устройстве — градирне (*9*) нагревшаяся вода отдает свое тепло атмосферному воздуху и снова подается в конденсатор.**

есть самый обыкновенный домашний холодильник. Ведь теплота, отнимаемая от охлаждаемых продуктов, теплота конденсации и теплота замерзания влаги, т. е. теплота образования снега и его охлаждения, выделяется из холодильника и обогревает комнату. В этом легко убедиться, приложив руку к задней стенке холодильника: она всегда теплая.

Холодильная машина может с успехом служить и для отопления. Вместо того чтобы прямо расходовать электроэнергию на обогревание печей, лучше ее использовать для приведения в действие холодильного цикла и отапливать дом с ее помощью снегом. Нетрудно доказать, что это вполне возможно.

Пусть температура снега на улице —3°Ц (предположим, что зима теплая, сущность вопроса это не изменит, а расчет упростит; можно снег заменить холодной водой из реки или хоть даже из Ледовитого океана—будет еще выгоднее). Температуру отопительных приборов в здании установим в +27° Ц. Разность между обеими температурами равна 30°. Абсолютная температура нагревателя 27°+273°=300°К. Коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей между такими близкими температурными пределами, очень мал — всего только:

$$\eta = \frac{30}{300} = 0{,}1.$$

Это значит, что если мы захотим получать в такой машине работу, то из каждых десяти калорий* тепла, полученных от нагревателя, в самом лучшем случае мы можем превратить в работу только одну калорию.

Но если мы заставим ту же машину работать в обратном направлении, то, затратив работу, эквивалентную только одной калории, сможем передать нагревателю (печке) целых 10 калорий, из которых 9 будут получены от холодильника (снега). Чем не подлинное отопление снегом?

## Как измеряют температуру теперь?

Открытие второго закона привело к возможности создать очень целесообразную шкалу температур. Ее установили, пользуясь поня-

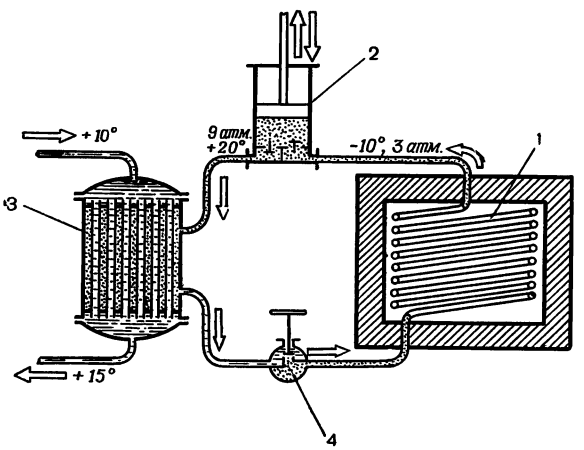



**Рис. 19. Схема холодильной установки: *1* — испаритель, размещенный в холодильной камере, окруженной слоем изоляции; *2* — компрессор, в котором за счет сжатия повышаются давление и температура охлаждаемого вещества; *3* — конденсатор, в котором охлаждаемое вещество отдает тепло циркулирующей воде, несколько повышая ее температуру; *4* — регулирующий вентиль, за которым рабочее вещество расширяется и температура его опять падает.**

* Малая калория—количество теплоты, нужное для нагрева 1 *г* воды на 1°Ц. Большая калория равна 1000 малых. Эта единица измерения выходит из употребления, в СИ она заменена единицей работы — джоулем. Малая калория равна 4,184 *дж*. В термодинамике по традиции иногда еще применяют калорию для измерения теплоты.

тием коэффициента полезного действия обратимой идеальной тепловой машины:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{T_н - T_х}{T_н}.$$

Умея точно измерять полученную работу $A$ и израсходованное тепло, мы можем установить новый способ измерения температуры, который не будет зависеть от свойств какого-либо определенного вещества.

Для этого нужно только выбрать одну какую-либо постоянную температурную точку (температуру нагревателя $T_н$)—пусть это будет точка замерзания воды — и условиться о размерах одного деления шкалы. Тогда уже просто построить с помощью тепловой машины всю температурную шкалу (для $T_х$), пользуясь величиной коэффициента полезного действия машины.

Такая шкала называется **термодинамической шкалой температур** или **шкалой абсолютных температур** $T$. Ее принято отсчитывать от абсолютного нуля и обозначать в градусах Кельвина (°К); она очень просто связана с температурой, измеренной по шкале Цельсия:

$$T° = t° + 273°.$$

На практике, конечно, нет необходимости строить неосуществимую тепловую машину, чтобы использовать ее в малоподходящей для нее роли термометра.

Совершенно точно совпадает с термодинамической шкалой температура, измеренная по изменению давления или объема идеального газа. А его с практически достаточной точностью можно заменить газом гелием, свойства которого очень близки к свойствам идеального газа.

Самый точный термометр наполнен гелием, и измерение температуры в нем производится по изменению давления при постоянном объеме. Такой термометр сложен, громоздок и неудобен. Он служит только эталоном для проверки обычных термометров.

## ЭНТРОПИЯ

### Трудная глава

Мы уже знаем, как был открыт первый закон термодинамики. На опыте была обнаружена независимость разности поглощенного системой тепла и совершенной ею работы от того, какие круговые процессы происходили в системе. Это и стало доказательством того, что в мире существует замечательная величина, свойственная любой системе, любому веществу, любому телу,— **внутренняя энергия.** Она определяется только

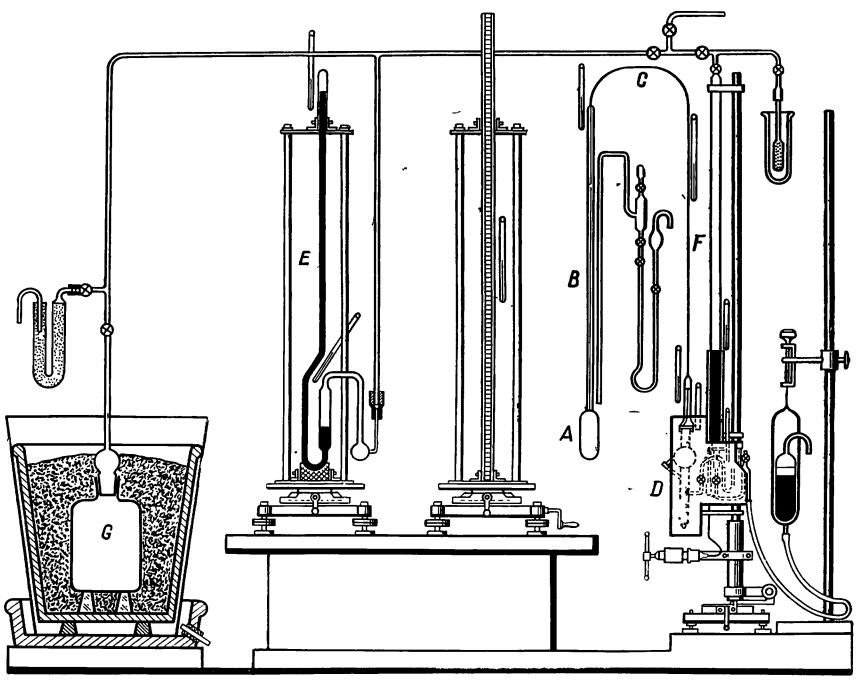



**Рис. 20. Современный гелиевый термометр постоянного объема. Термометрический сосуд *A* переходит в стеклянный капилляр *B*, который стальным капилляром *C* соединяется с коротким коленом *D* ртутного манометра. Постоянство объема в термометре контролируется контактом поверхности ртути со специальной иглой. Барометр *E* измеряет давление гелия в длинном колене манометра *F*. Сосуд *G* с гелием обеспечивает постоянство давления гелия над ртутью в *F*. Сравните сложнейшую схему современного газового термометра-эталона с его предком — газовым термометром постоянного объема XVIII века (рис. 6).**

состоянием системы и не зависит от того пути, по которому система в это состояние пришла.

Запомним это и снова вернемся ко второму закону термодинамики.

Значение к.п.д. обратимой тепловой машины, работающей с любым веществом (т. е. величину, показывающую, какую долю затраченного тепла мы можем превращать в работу), можно выразить формулой:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{Q_н - Q_х}{Q_х} .$$

Эта величина равна

$$\eta = \frac{T_н - T_х}{T_н} , \text{ или } \frac{Q_н - Q_х}{Q_н} = \frac{T_н - T_х}{T_н} .$$

В науке часто несложные, простые арифметические действия приводят к большим и важным выводам. Относитесь к ним с уважением— такие действия, несмотря на их простоту, иногда раскрывают большую научную перспективу.

Вам сейчас придется внимательно проследить за преобразованием выражения для к. п. д. Оно преобразуется очень просто. Конечно, это выражение можно переписать так:

$$1 - \frac{Q_х}{Q_н} = 1 - \frac{T_х}{T_н} .$$

Затем его можно упростить:

$$\frac{Q_х}{Q_н} = \frac{T_х}{T_н} .$$

Полученную пропорцию лучше переписать так:

$$\frac{Q_н}{T_н} = \frac{Q_х}{T_х} .$$

Не забывайте, что индексом «н» обозначены тепло, взятое у нагревателя, и его температура, а индексом «х» — тепло, отданное холодильнику, и, соответственно, его температура.

И, наконец, можно написать:

$$\frac{Q_н}{T_н} - \frac{Q_х}{T_х} = 0.$$

Учтем, что мы условились считать тепло, которое система получает, положительным, а то тепло, которое она отдает,—отрицательным.

Ясно, что этот результат представляет собой алгебраическую сумму отношений теплоты и соответствующей температуры. Для обратимого цикла Карно эта сумма оказалась равной нулю:

$$\sum_{\odot} \left(\frac{Q}{T}\right) = 0.$$

В термодинамике принято говорить: **сумма приведенных теплот для обратимого цикла Карно равна нулю.**

Оказывается, что это справедливо и для любого обратимого, т. е. квазистатического, цикла, каким бы сложным оно ни было. Это замечательный результат, один из наиболее важных для всего естествознания.

Из него сейчас же следует очень важный вывод: для любой системы и для любого незамкнутого процесса, каким бы он ни был, из скольких бы стадий ни состоял, обязательно должно существовать такое особое свойство системы, изменение которого при переходе из одного состояния в другое равно сумме приведенных теплот.

Это, конечно, не очень понятно; не так уж легко представить себе, о чем тут идет речь, а наглядно это свойство вообразить вряд ли удастся. Но тем не менее такое свойство действительно существует в природе, оно играет важнейшую роль не только в термодинамике, но и во всем естествознании, включая даже философию.

Это свойство принято обозначать буквой $S$. Его изменение при переходе системы из одного состояния в другое равно

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \sum_1^2 \frac{Q}{T} .$$

Открыл его немецкий ученый, знаменитый термодинамик Р. Клаузиус. Это уравнение носит его имя.

Обнаружив в природе новую, ранее не известную никому величину, Клаузиус назвал ее странным и непонятным словом «энтропия», которое сам и придумал. Он так объяснил его значение: «тропе» по-гречески означает «превращение». К этому корню Клаузиус добавил две буквы — «эн», так чтобы получившееся слово было бы по возможности подобно слову «энергия». Обе величины настолько близки друг другу своей физической значимостью, что известное сходство в их названиях было целесообразно.

Открытие второго закона позволило обнаружить в природе новое замечательное свойство— энтропию, подобно тому как первый закон термодинамики привел к открытию точного понятия «внутренняя энергия».

## Можно ли обнаружить энтропию?

К сожалению, никак нельзя. Человек не обладает такими органами чувств, которые давали бы ему возможность «видеть» непосред-

ственно — «много» или «мало» энтропии содержит система.

Но, пожалуй, ни сожалеть, ни удивляться по этому поводу не следует. Ведь мы, например, привыкли к «простому» понятию «энергия». Но до того как раздастся выстрел, трудно судить по внешнему виду пороха в ружейном заряде, велик ли запас его внутренней энергии.

## ЗАЧЕМ НУЖНО ПОНЯТИЕ «ЭНТРОПИЯ»

### Тоже трудная глава

Химики совсем недавно завершили синтез алмазов. Всего несколько лет назад ученые об этом только мечтали. Столько уже было в истории науки неудачных, бесплодных попыток!

Сверкающие драгоценные камни теперь не в сказке, а наяву растут в бронированной аппаратуре, под высоким давлением, при высокой температуре. На заводе синтетических алмазов могут быть теперь изготовлены самые настоящие алмазы, и при этом столько, сколько их нужно технике. Разве это не подлинное чудо? Это замечательный пример того, как наука сумела осуществить сказочную мечту.

Технология синтеза алмаза трудна и сложна. Конечно, очень нелегко рассчитать и построить мощную и сложную аппаратуру. Непросто создать в ней нужное давление в сотни тысяч атмосфер. Очень трудно при этом поддерживать высокую температуру. Но все это легко и просто по сравнению с самой главной, с самой большой трудностью, по сравнению с основной проблемой — как узнать, при каких условиях, в каких реакциях углерод может приобретать форму алмаза. Это проблема теоретического расчета, без ее решения эмпирический поиск безнадежен. Если преодолена эта трудность, все остальное разрешимо.

Проблема промышленного синтеза алмазов — пример типичной термодинамической задачи. Очень странные процессы использует термодинамика для своих расчетов. Квазистатический воображаемый процесс — это цепь **почти** равновесных состояний системы. Меняется квазистатический процесс на обратный — меняются на обратные и передачи теплоты и работы. Абсолютные их значения остаются прежними. После протекания обратимого процесса можно восстановить первоначальные состояния всех его участников — самой системы, источников тепла, источников работы — без каких-либо изменений в окружающей среде, т. е. в остальном мире. К обратимому, квазистатическому процессу предъявляются взаимно противоречивые требования: быть процессом и быть равновесием, т. е. не быть процессом. Чтобы осуществить такой процесс, нужны идеальные условия, подобные тем, которые были установлены в цикле Карно.

Все реальные процессы, протекающие в действительности, нестатические — все они необратимы. Их нельзя по желанию провести в прямом и обратном направлении, не оставив никакого следа в окружающем мире. У всех изменений в природе есть определенное направление.

Термодинамика должна помочь исследователям заранее узнать, пойдет ли реальный процесс, не осуществляя его в действительности. Это ее основная задача. Для этого и нужно понятие «энтропия».

Энтропия — это свойство системы, которое полностью определяется состоянием системы. Какими бы путями ни перешла система из одного состояния в другое, изменение ее энтропии будет всегда одно и то же. Но вычислять изменение энтропии термодинамика умеет и может только на квазистатических, обратимых путях. В этом случае изменение энтропии точно равно сумме приведенных теплот:

$$S_2 - S_1 = \sum \left( \frac{Q}{T} \right)_{\text{обратимый}}$$

Если же в системе происходили необратимые, нестатические процессы, если в ней протекали процессы теплопередачи при конечных перепадах температуры, процессы, связанные с трением, любые реальные процессы, а начальное и конечное состояния при этом были теми же самыми, то изменение энтропии будет обязательно точно таким же, но сумма приведенных теплот в необратимом процессе уже не будет равна изменению энтропии.

Вот поэтому-то термодинамика рассматривает и изучает придуманные, несуществующие квазистатические процессы. Они дают возможность рассчитать и определить изменение энтропии для реальных процессов, для которых непосредственно сделать это нельзя.

### Зачем ученому нужно знать энтропию?

Во всех реальных процессах, при которых система может **сама** любым необратимым путем **самостоятельно** переходить из одного состояния в другое, **общая** энтропия всех участников процесса может только возрастать.

Это и дает возможность исследователю заранее предсказать, как пойдет неизвестный процесс, заранее предвидеть, при каких условиях ему удастся заставить еще не изученную на опыте реакцию пойти в нужном направлении. Для этого ученому необходимо иметь сведения об энтропии **всех** участников процесса, включая источники теплоты.

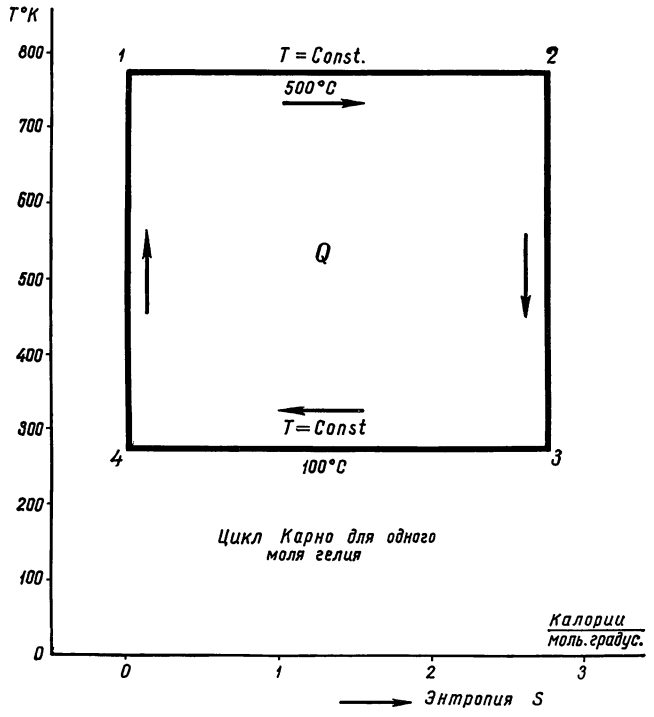



**Рис. 21. Применение понятия «энтропия» значительно упрощает сложные расчеты. Вот, например, как просто изображается в координатах $T - S$ (температура — энтропия) тот же самый цикл Карно для одного моля идеального газа, который представлен на рис. 16, II. В теплотехнике такой способ изображать циклы тепловых машин общепринят. Он очень удобен. В этом случае площадь цикла соответствует теплоте, полученной системой.**

Химическая реакция, как и любой другой процесс, связана с работой (в результате реакции могут выделяться или поглощаться газообразные вещества или изменяться объемы реагирующих веществ и, следовательно, может совершаться работа расширения или реакция может протекать в химическом источнике тока и совершать электрическую работу и т. п.). Химическая реакция, как и любой другой процесс, всегда сопровождается обменом тепла с окружающей средой. Если реакция идет только с поглощением тепла, систему нужно нагревать. Если тепло выделяется — охлаждать.

Для проведения расчета очень удачно то, что энтропия источников работы не может изменяться. Ведь в понятие «работа» не входят ни теплота, ни температура. Это очень сильно упрощает расчет энтропии.

Изменение энтропии источников теплоты нужно обязательно учитывать, хотя это и усложняет задачу.

Если реакция, как и любой процесс, может быть проведена обратимо, то расчет изменения энтропии прост. В качестве примера можно рассмотреть любой изотермический процесс (испарение, плавление, изотермическое расширение). В этом случае существует, кроме системы, только один источник тепла. Их температуры **одинаковы.** Тепло, поглощенное системой, отдано источником (нагревателем). Насколько увеличилась энтропия системы, настолько же уменьшилась энтропия источника. Общее изменение энтропии равно нулю.

Это очень важное заключение справедливо для любых процессов, в которых участвует любое количество источников теплоты, если только эти процессы квазистатические — обратимые. Можно высказать общее положение: **в любом обратимом процессе общее изменение энтропии равно нулю.** Справедливо и обратное положение: **если общее изменение энтропии равно нулю, то процесс обратимый.** Такая зависимость очень важна. Она и позволяет ученому не наблюдать за процессом при всех условиях. Ему достаточно знать только начальное и конечное состояния системы и источников теплоты, и он сможет судить, был ли этот процесс обратимым или нет.

Обратимый процесс в сущности никуда не идет, никуда не направлен. Это цепь равновесных состояний. Реальный, необратимый, нестатический процесс такой особенностью не обладает, именно потому, что он не равновесный, он самопроизвольно идет только в одну сторону. Только в том направлении может идти реальный процесс, в котором общая энтропия, т. е. энтропия системы вместе с энтропией всех источников теплоты, может только возрастать. Обратное положение тоже справедливо: если общая энтропия возрастает, то процесс необратим и может самопроизвольно протекать в нужном направлении.

Если расчет приводит к результату, согласно которому общая энтропия уменьшается, то процесс невозможен. В данном направлении он не пойдет. Всякие попытки осуществить такой процесс будут абсолютно безнадежны. Этот энтропийный принцип широко используется

в науке и технике, и в первую очередь в химии и химической технологии, для суждения о том, можно ли осуществить нужную химическую реакцию или получить нужное вещество.

Для облегчения таких расчетов, часто очень сложных, существуют специальные справочные издания, в которых собраны в таблицы заранее рассчитанные значения энтропии различных химических соединений.

## Как же вычислить энтропию?

Вычислить вообще энтропию системы, энтропию любого тела нельзя, точно так же, как нельзя вообще определить его энергию. Вычислить можно только изменение энтропии при переходе системы из одного состояния в другое, если этот переход провести квазистатическим путем. Расчет этот по существу прост, правда, из-за недостатка экспериментальных данных часто он становится сложным и трудным, а иногда и невозможным. Чтобы вычислить энтропию, нужны точные измерения теплоемкостей и тепловых эффектов, необходимо также знать уравнение состояния.

Чтобы получить понятие о том, как в простейшем случае рассчитывается энтропия, полезно внимательно рассмотреть график, на котором приведен расчет изменения энтропии воды.

Специального названия для единиц, в которых измеряют энтропию, не придумано. Ее измеряют в $\frac{\text{калория}}{\text{моль}\cdot\text{градус}}$.

## Что такое энтропия?

Много было дано ответов на вопрос, что такое энтропия, но ни один из них не может быть назван полностью удовлетворительным. Самый точный ответ такой: **изменение энтропии — это сумма приведенных теплот в обратимом процессе.** Ясно? Для специалиста-термодинамика ясно и достаточно. Нам же, пожалуй, стоит познакомиться еще с одним определением энтропии.

Вернемся к циклу Карно. Из всего тепла $Q_н$, как мы знаем, в работу можно превратить не больше, чем $Q_н - Q_х$. Тепло, отданное холодильнику, при данных температурах нагревателя и холодильника в работу уже не превратишь! Оно для нас потеряно, пропало без пользы. Сосчитать, сколько же такого обесцененного тепла, нетрудно. Не меньше чем

$$Q_х = \frac{Q_н}{T_н}\cdot T_х.$$

Но величина $\frac{Q_н}{T_н}$ — это не что иное, как изменение энтропии нашего работающего в цикле

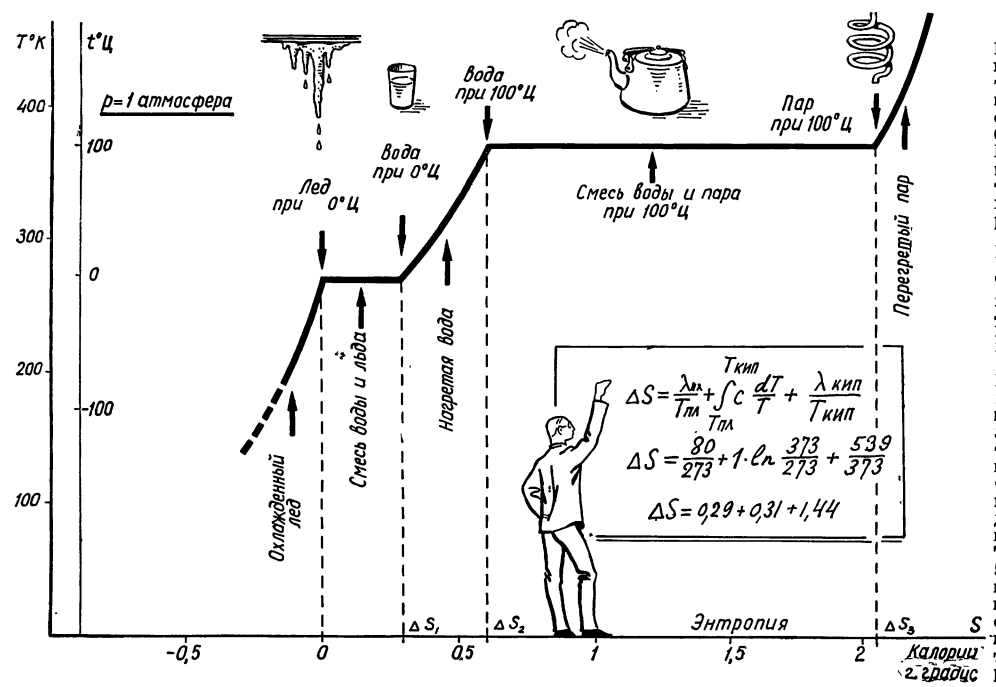



**Рис. 22. Рассмотрим на примере воды, как надо рассчитывать энтропию. Прежде всего нужно выбрать начальное состояние системы. Пусть это будет состояние льда при 0° Ц. Во всех процессах, протекающих при постоянной температуре, изменение энтропии находится очень просто — оно равно теплоте приведенной обратимого процесса $\frac{Q}{T}$. Это справедливо и для плавления льда, и для испарения воды. Для нагревания воды расчет усложняется, ее температура при нагревании от 273° К до 373°К изменяется непрерывно. Поэтому приходится суммировать бесконечно малые изменения энтропии. Для вычисления энтропии нужно знать теплоемкость и теплоту превращений. Теплоемкость воды $C=1$ калории на грамм при изменении температуры на 1 градус. Для воды теплота плавления = 80 калориям на грамм. Теплота испарения при 100°Ц — 539 калорий на грамм. Точный расчет энтропии очень громоздок и труден. Приходится учитывать, как влияет на изменение теплоемкости не только изменение температуры, но и изменение давления.**

вещества при получении им тепла от нагревания

$$\frac{Q_н}{T_н} = \Delta S.$$

Следовательно, потерянное для нас бесполезно тепло, которое мы не можем превратить в работу, равно

$$Q_х = T_х \Delta S.$$

Это дает нам возможность дать еще одно определение энтропии, не такое строгое и точное, но чуть-чуть более наглядное: **энтропия — это мера обесцененной энергии,** бесполезной энергии, **которую нельзя использовать для получения работы.**

## Так что же такое энтропия?

Как вы думаете, что произойдет, если кусок сахара положить в стакан горячего чая? Нет, это не шутка, это очень важный вопрос. Ответ на него, очевидно, всем известен. Сахар растворится, чай станет сладким. Но молекулы сахара, участвуя в тепловом движении при температуре горячего чая, могут беспорядочно двигаться в стакане куда угодно, и, в частности, любая из молекул может рано или поздно оказаться у дна стакана. В этом нет и не может быть сомнения.

Но если каждая из молекул способна на это, то почему бы им всем сразу не собраться одновременно на дне стакана, да так, чтобы снова возник бы из воды растворившийся в ней кусок сахара. Возможно это или нет? Конечно, нет. Но почему?

Раскаленный конец кочерги, вынутый из печи, быстро остывает на воздухе. При этом воздух нагревается, возрастает средняя скорость его молекул. В воздухе, находящемся в термическом равновесии, существуют молекулы с разной энергией, среди них есть и очень быстрые, «горячие» молекулы. Их распределение и направление их движения беспорядочны. Каждая из таких молекул может оказаться в любом месте. Может быть, стоит подождать, пока холодная кочерга снова раскалится под ударом таких быстрых молекул. Почему бы им не собраться «случайно» всем в одном месте и не нагреть холодный металл? Возможно это? Конечно, нет. Но почему?

Продырявленный футбольный мяч шипит и «испускает дух» — опадает. Но ведь молекулы воздуха движутся беспорядочно во все стороны, совершая тепловое движение. Почему бы им совершенно «случайно» не начать двигаться в одну и ту же сторону, так чтобы дырявый мяч сам собой снова надулся? А это возможно? Ну конечно, нет! Но почему?

Почему нельзя обратить явление диффузии? Почему необратимо явление теплопроводности? Почему не может само собой повыситься давление газа? И почему всегда «сами собой» идут обратные процессы выравнивания температур, выравнивания давлений, выравнивания концентраций? Все они связаны с возрастанием энтропии системы. Что это значит?

С точки зрения молекулярно-кинетических представлений все это объясняется довольно просто и наглядно: **любая система стремится перейти из менее вероятного состояния в более вероятное.**

Наиболее вероятное распределение молекул газа — это равномерное распределение по объему. Наиболее вероятное распределение скоростей молекул — это также совершенно определенное равномерное распределение в разных частях системы. Если в системе появятся отклонения в концентрации, температуре или давлении, то возникнут самостоятельно идущие процессы выравнивания и они снова приведут систему в состояние равновесия — в наиболее вероятное состояние.

Чтобы лучше понять, что такое термодинамическая вероятность данного состояния газа, нужно перечитать во втором томе ДЭ главу о вероятности. В термодинамике вероятностью $w$ данного состояния системы называют общее число способов, которыми можно это состояние осуществить, переставляя одну молекулу на место другой.

Связь между вероятностью данного состояния системы и ее энтропией была установлена двумя знаменитыми учеными — Гиббсом и Больцманом. На простом примере можно это легко показать. Известно, что энтропия газа пропорциональна его количеству. Это значит, что энтропия всей системы равна сумме энтропий ее отдельных частей. Разделим газ на две части, тогда очевидно, что

$$S = S_1 + S_2.$$

По законам теории вероятности, вероятность данного состояния всего газа равна произведению вероятностей его отдельных частей:

$$w = w_1 \cdot w_2.$$

Таким образом, суммированию энтропий соответствует умножение термодинамических вероятностей состояния отдельных частей. Из

всех математических функций такими свойствами обладают только логарифмы.

Таким образом, **энтропия должна быть пропорциональна логарифму термодинамической вероятности:**

$$S = k \ln w.$$

В этой формуле $k = \frac{R}{N}$, где $R$ — газовая постоянная, $N$ — число Авогадро.

Следовательно, энтропия системы определяется вероятностью ее состояния. Это очень важно.

Большой самостоятельный раздел науки— **статистическая термодинамика**, в основе которого лежит представление о статистической природе энтропии, — достиг замечательных успехов. Химикам во многих случаях теперь не нужно проводить долгие, трудные и дорогие эксперименты. Они могут рассчитать нужные им реакции, хорошо изучив молекулярные спектры интересующих их соединений.

Стоит специально изучить эту новую, правда, трудную, но интересную и увлекательную науку даже только для того, чтобы понять, как же это оказалось возможным, изучая свет, рассчитывать и строить химические заводы.

## ТРЕТИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Третий закон (по общему счету он четвертый и пока последний) — основной закон термодинамики. Он был открыт в результате исследований в области низких температур.

Открытие второго закона подтвердило, что существует **абсолютный нуль температуры,** предсказанный еще Ломоносовым, первым исследователем низких температур, впервые сумевшим заморозить ртуть и искусственно получить очень низкую температуру (—65°Ц).

Из уравнения второго закона

$$\eta = \frac{A}{Q_н} = \frac{T_н - T_х}{T_н}$$

следует, что возможно существование такой предельно низкой температуры, при которой все тепло $Q_н$, взятое от нагревателя, может быть полностью превращено в работу. Как видно из уравнения, это осуществимо только при $T_х = 0$. Это и есть термодинамическое определение абсолютного нуля.

Энтропийный метод расчета направления термодинамических процессов обладает существенным недостатком. Как мы уже знаем, чтобы рассчитать возможность любого процесса, нужно знать как изменение энтропии системы, так и изменение энтропии источников теплоты— и тех, от которых система получает тепло, и тех, которым его отдает.

Но изменение энтропии системы часто бывает очень трудно определить, а иногда даже совсем невозможно. Такой расчет ведь может быть проведен только с помощью обратимого процесса. А для этого нужно знать, при каких условиях изучаемая система может находиться в равновесии.

Те исследователи, которые захотели бы на основании только одного второго закона рассчитать процесс получения алмазов, должны были бы экспериментально, на опыте изучить, при каких условиях графит находится в равновесии с алмазом, подобно тому как лед с водой. Затем им пришлось бы осуществить при этих условиях превращение графита в алмаз, измерив теплоту превращения. А это практически невозможно.

Необходимость экспериментально определить равновесие очень снижает ценность энтропийного принципа, но, конечно, не обесценивает его. Зная изменение энтропии при одних условиях, можно рассчитать его при любых других значениях температуры и давления. Такие энтропийные расчеты — главное содержание большой самостоятельной науки — **химической термодинамики.**

Вычисляя изменение энтропии, нельзя обойтись одним вторым законом без того, чтобы на опыте не изучить равновесное состояние при каких-либо определенных условиях. Эта большая принципиальная трудность была термодинамикой преодолена. Изучение поведения вещества вблизи абсолютного нуля, в области очень низких температур, и теоретические исследования теплоемкости тел на основе квантовой теории привели к установлению еще одного—третьего закона термодинамики, который впервые был высказан известным немецким физико-химиком Нернстом.

Согласно третьему закону, **по мере приближения температуры любого тела к абсолютному нулю изменение его энтропии, при изменении его любого свойства, тоже стремится к нулю и становится предельно равным нулю при достижении абсолютного нуля.** Хотя эта формулировка и звучит подобно детской скороговорке, она выражает очень важный закон природы. Знание его сильно повысило возможность термодинамического предсказания:

$$S_2 - S_1 \underset{T \to 0}{\to} 0.$$

Это математическое выражение третьего закона позволяет провести полный расчет химической реакции, не проводя никаких предварительных экспериментальных исследований химического равновесия. Решая проблему синтеза алмаза, исследователи были освобождены благодаря третьему закону от необходимости предварительно изучить хотя бы одно равновесие между алмазом и графитом. Раз и навсегда, для любой системы, а следовательно, и для алмаза стало известным изменение энтропии при абсолютном нуле, хотя, как мы знаем, он недостижим.

На этом примере мы и рассмотрим, как решается термодинамикой расчет возможности осуществить новое, неизвестное химическое превращение.

В основе расчета теперь лежит знание, как изменяется энтропия при переходе графита в алмаз при абсолютном нуле. По третьему закону, это изменение равно нулю. Зная теплоемкости графита и алмаза в пределах от абсолютного нуля вплоть до высоких температур, всегда можно вычислить, как изменяется энтропия при превращении графита в алмаз при любой температуре.

По уравнению состояния графита и алмаза можно вычислить изменение энтропии и для любого давления.

Далее нужно еще знать теплоту перехода графита в алмаз (чтобы вычислить изменение энтропии источника теплоты). Ее можно найти, измерив теплоту сгорания и графита и алмаза. Из этих данных, по закону Гесса, легко находится теплота перехода, нужная для расчета.

По известным теплоемкостям и по уравнению состояния можно пересчитать теплоту перехода от ее значения при обычных условиях на любые значения температуры и давления.

Таким путем и могут быть получены все данные, необходимые для того, чтобы можно было предсказать условия, при которых возрастает общая энтропия в процессе превращения графита в алмаз, при которых может, следовательно, происходить самопроизвольное образование алмаза.

Этот термодинамический расчет требует предварительных точнейших исследований теплоемкостей, точного знания уравнений состояния в очень широких пределах температуры и давления. Но такой термодинамический расчет был проведен советскими исследователями, и этот расчет полностью оправдался. Недавно в СССР был с успехом осуществлен промышленный процесс синтеза алмазов. Без термодинамики это было бы невозможно.

## Полмиллиарда уравнений

Термодинамика основана всего на четырех законах. Эти законы представляют собой обобщение огромного опыта, накопленного наукой в течение столетий.

Пользуясь могучим аппаратом математики, и в первую очередь методами дифференциального исчисления, термодинамика устанавливает связи между самыми разнообразными явлениями и процессами. Ее всеобщие законы приложимы ко всем отраслям физики и химии: к свойствам газов, жидкостей и твердых тел, к химическим реакциям, к магнитным и электрическим явлениям. Они приложимы к грандиозным космическим процессам, изучаемым астрофизикой. Ее выводы неоспоримы и незыблемы.

Один известный ученый подсчитал общее число уравнений, которые могут быть получены термодинамикой: их число оказалось невообразимо большим — свыше пятисот миллионов уравнений. А ведь каждое из них отражает реальную закономерность, действительную связь между свойствами вещества, между явлениями, протекающими в нашем реальном мире. Без термодинамики не было бы и не могло бы быть современной теплотехники, не было бы химической промышленности, не было бы металлургии, не существовала бы, в частности, и промышленность удобрений. Синтез аммиака из водорода и азота, синтез искусственного жидкого топлива, синтез алмазов — во всем этом проявилась мощь термодинамики. В совокупности знаний, без которых нельзя вывести на орбиту космический корабль, термодинамика занимает важное место.

Без помощи термодинамики не может обойтись ни одна область естествознания, ни одна точная наука. В области своего применения термодинамика обладает такой большой возможностью предсказания, что по справедливости может быть названа «грядущего вестником». Тот, кто знает и любит термодинамику, овладел ее методами и научился их применять, поистине может быть назван современным кудесником.

Термодинамику должен изучить каждый, кто любит науку, какой бы из отраслей знаний он ни собирался посвятить свою жизнь.

■

# СВЕТ

Задумывались ли вы над тем, что все живое на Земле существует только благодаря лучистой энергии солнечного света? Если бы на нашей планете не было атмосферы, которая отражает и лишь частично поглощает энергию Солнца, поверхность земного шара там, где солнечные лучи падают на нее отвесно, получала бы за минуту 8,37 *дж* (2 калории) на 1 *см*². Эта величина называется солнечной постоянной и измерена с большой точностью вне атмосферы Земли с помощью ракет.

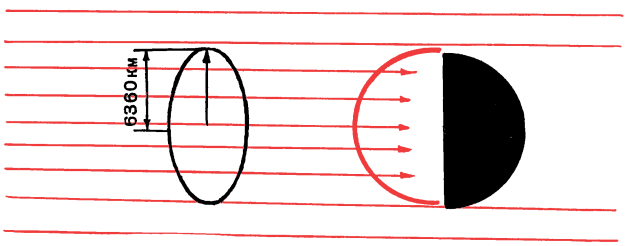
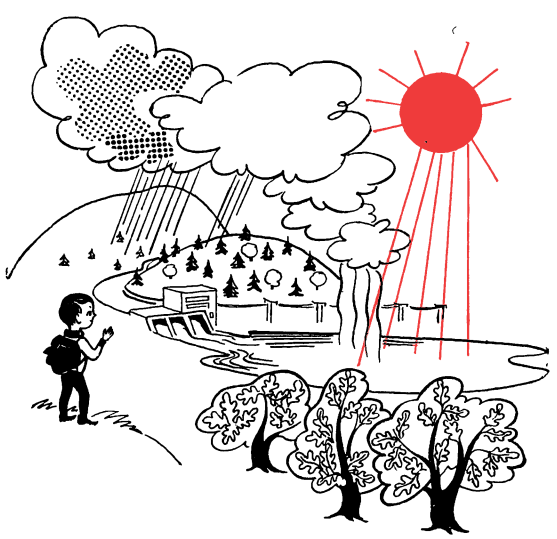



Рис. 1.

Если учесть, что Солнце освещает только половину поверхности земного шара (рис. 1), можно подсчитать, что за секунду оно посылает на нашу планету энергию, которая выделилась бы при сгорании 40 млн. *т* каменного угля! Крупнейшая в мире электростанция могла бы выработать такое количество энергии лишь за 30 лет. Без солнечного света Земля стала бы обледенелым, безжизненным космическим телом. На Земле нет других в какой-то мере сравнимых с солнечным светом источников энергии.



Растения, а значит, и все живое существуют за счет энергии Солнца. Сжигая в печах каменный уголь и нефть, мы расходуем энергию солнечного света, когда-то запасенную растениями. Включая электрическую лампочку, электромотор, мы потребляем солнечную энергию: в свое время вода, вращающая турбины гидроэлектростанции, была превращена солнечной энергией в пар и перенесена в тучах на возвышенности.

На Землю падает лишь около четырех десятимиллиардных долей энергии, излучаемой Солнцем. А вся его энергия образуется в результате термоядерных процессов. Масса солнечного вещества непрерывно превращается в энергию. При этом 1 *г* массы равнозначен энергии, выделяющейся при сгорании 20 000 *т* угля.

Мы не знаем точно, как именно преобразуется масса Солнца в энергию. Ясно только, что это происходит в термоядерном процессе (см. главу «Химия Вселенной» в ст. «Великий закон»). И, кроме того, мы знаем: энергию этого гигантского «термоядерного реактора» доставляет на Землю свет.

## ЧТО МЫ ПОНИМАЕМ ПОД СЛОВОМ «СВЕТ»

Итак, свет — это поток энергии. Энергия может передаваться по-разному, в частности колебательными процессами. Пока что мы будем рассматривать свет как электромагнитное излучение, такое же, как радиоволны, но волны его гораздо короче. В фотометрии — науке, изучающей световые лучи,— светом называется электромагнитное излучение, ощущаемое глазом человека. Такое излучение дают волны, длина которых лежит в диапазоне между 0,39 и 0,75 *мк*. В этой статье к понятию «свет» отнесены и не видимые глазом лучи, т. е. светом названы электромагнитные излучения с длинами волн, выходящими за эти пределы. Ведь и академик С. И. Вавилов в книге «Глаз и Солнце» писал: «Существует бесконечное разнообразие явлений, которые нам придется назвать световыми и которые невидимы».

## СВЕТОВЫЕ ЛУЧИ

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Эта истина была известна более

чем 2000 лет назад, когда зародилась наука о свете. Доказать это легко (рис. 2). Перед светящимся телом $S$ на расстоянии $l$ поставим экран с круглым отверстием, диаметр которого равен $d$. Если размеры тела $S$ значительно меньше, чем $l$ и $d$, тогда источник света ($S$) называется точечным. За экраном в параллельной ему плоскости поместим лист белой бумаги: на нем появится правильный светлый круг. Это и доказывает, что свет идет прямолинейно.

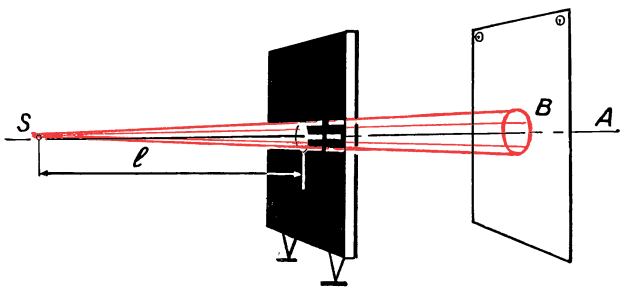



Рис. 2.

Если $l$ намного больше, чем $d$, то конус $SB$, заполненный светом, называют световым лучом. Такой луч можно изобразить в виде прямой $SA$, совпадающей с осью симметрии конуса.

Свойство света распространяться прямолинейно можно использовать для изображения предметов. Например, если в абажуре лампы проделать небольшое отверстие (рис. 3), то на потолке появится светящаяся полоса, напоминающая подкову. Это — изображение раскаленной в лампе нити. Отверстие $nm$ может быть любой формы, лишь бы его наибольший линейный размер был намного меньше, чем нить лампы.

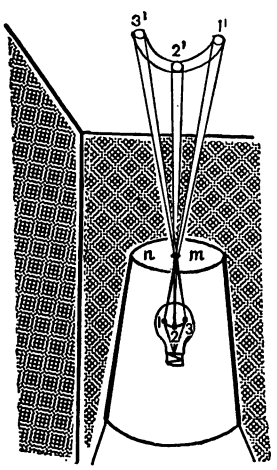
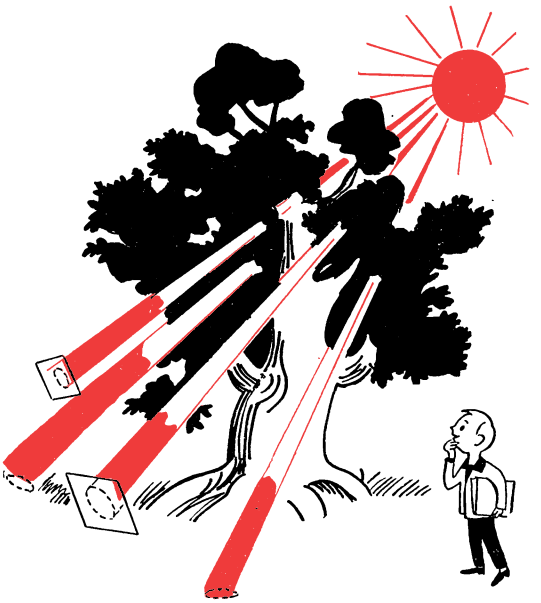



Рис. 3.

Разобьем нить лампы на малые участки, каждый из которых можно считать точечным источником света. Тогда участок *1* даст на потолке пятнышко *1'*, участок *2* — пятнышко *2'* и т. д. В результате из таких пятнышек получится изображение всей нити. Проделайте такой опыт сами. Если вы окружите лампу непрозрачным материалом, чтобы потолок не подсвечивался, то сможете получить на потолке изображение не только нити, но и всего баллона лампы.



В летний день в тени дерева у всех светлых пятен на дорожке одинаковые очертания, хотя у просветов в кроне дерева самая разнообразная форма. Каждый из небольших просветов дает на почве изображение Солнца.

Один из простейших оптических приборов — **камеру-обскуру** — может сделать каждый из читателей. Это небольшой ящик, не пропускающий внутрь себя посторонний свет (рис. 4). В одной из его стенок проделано очень маленькое отверстие (0,2 *мм*). В противоположную стенку ящика вделано матовое стекло. С помощью камеры-обскуры можно получать изображения любых предметов, испускающих или отражающих свет. Если вместо матового стекла поместить в ящик светочувствительную пластинку, можно получить и фотоснимок. Старинные фотографии — **дагерротипы** получали именно таким способом: с помощью камеры-обскуры, без каких-либо объективов.

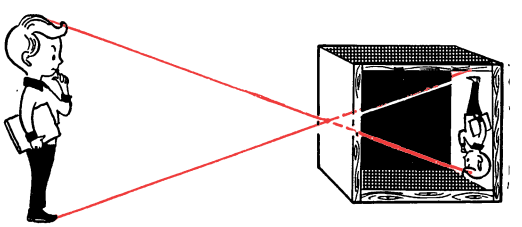


Рис. 4.

## САМАЯ БОЛЬШАЯ СКОРОСТЬ

Еще в 1676 г. датский астроном Рёмер, наблюдая спутники Юпитера, вычислил скорость света в пустом пространстве. Расстояние от Солнца до Земли в 150 млн. *км* свет проходит всего за 8 минут. По современным данным его скорость равна 299 792 *км/сек*. В формулах эта величина всегда обозначается буквой *с*.

С особой тщательностью скорость света в земных условиях измерил американский физик Альберт Майкельсон. Из его опытов оказалось, что скорость света не зависит от скорости его источника.

Представим себе, что на корабле, стоящем на якоре, стреляет по цели *А* пушка, установленная на его носу (рис. 5). Скорость снаряда — $v_с$. Если корабль снимется с якоря и пойдет вперед со скоростью $v_к$, скорость снаряда относительно цели *А* будет уже равна $v_с + v_к$. А скорость снаряда относительно цели *Б* из пушки, установленной на корме корабля, будет равна $v_с - v_к$. Итак, при стрельбе в направлении движения корабля его скорость прибавляется к скорости снаряда, а при стрельбе в противоположном направлении — вычитается.

Свет этому простому правилу не подчиняется. Если вместо пушек будет установлена на корабле лампа, то свет ее вспышки дойдет до равноотстоящих от корабля пунктов *А* и *Б* одновременно, какой бы ни была скорость корабля, даже если она сравнима со скоростью света.

Астрономы с помощью мощных телескопов обнаружили так называемые двойные звезды (см. в т. 2 ДЭ ст. «Звезды и глубины Вселенной»), которые находятся от нас на расстоянии многих световых лет. На рисунке 6 схематически изображена такая звезда. Она состоит из двух звезд: звезда *1* вращается вокруг звезды *2*. Предположим, что звезда *2* неподвижна относительно Земли и что орбита звезды *1* лежит в одной плоскости с Землей. Величина скорости вращения звезды *1* постоянна и равна *v*. Тогда в положении *А* к скорости света, идущего от этой звезды к Земле, прибавилась бы скорость *v*, а в положении *Б* эта скорость вычиталась бы.

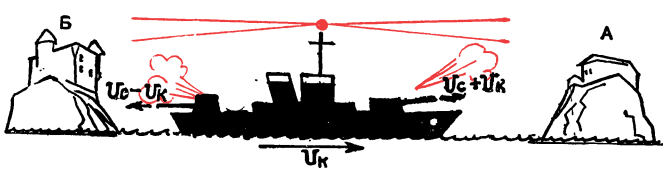



Рис. 5.

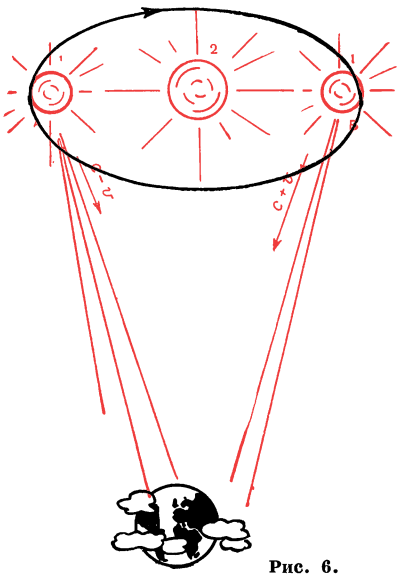



Рис. 6.

Если свет из точки *А* доходит до Земли за время $t + \tau$, то на путь из точки *Б* ему потребуется время $t$. Время запаздывания $\tau$ обусловлено уменьшением скорости света на величину $v$ в точке *А* и таким же увеличением в точке *Б*. Если из положения *Б* звезда *1* приходит в положение *А* за то же время $\tau$, то на Земле наблюдатель увидел бы изображение звезды *1* одновременно в двух точках ее орбиты: *А* и *Б*. Но никто из астрономов никогда не наблюдал многократные изображения двойных звезд. Значит, движение звезды *1* не влияет на скорость испускаемого ею света. Это и есть одно из доказательств, что скорость света не зависит от скорости его источника.

Причину этого явления удалось объяснить Альберту Эйнштейну. Для этого он создал теорию относительности, в основу которой положен факт, полученный опытным путем: независимость скорости света от скорости источника.

Из теории относительности вытекает, что не существует скорости большей, чем скорость света в пустоте (в вакууме). Это предельная скорость в природе.

Другое важнейшее следствие теории относительности — связь между массой и энергией. Энергия $E$, заключенная в массе $m$, равна квадрату скорости света в пустоте, умноженному на эту массу: $E = mc^2$. Это соотношение играет громадную роль в понимании физики атомного ядра, астрофизики и других наук.

Вот к каким глубоким выводам привело измерение скорости света! Рассказывают, что

Эйнштейн однажды спросил Майкельсона, почему тот занимается именно измерением скорости света. И Майкельсон ответил: «Потому что это дьявольски интересно!» Майкельсон занимался этими исследованиями почти всю жизнь: задача была трудной и решать ее было интересно. Он, конечно, и не предполагал, что его эксперименты помогут Эйнштейну создать гениальную теорию относительности.

## ОТКУДА БЕРЕТСЯ ЦВЕТ?

Еще в средние века было известно, что луч белого света, проходя через стеклянную призму, становится цветным. Считалось, что под действием стекла свет меняет свою окраску. Белый цвет казался тогда людям самым простым. Да и в наши дни человек, незнакомый со свойствами света, думает именно так.

В 1672 г. английский ученый Исаак Ньютон опроверг это ложное представление. На пути солнечного луча, проникающего в темную комнату через малое отверстие в ставне окна, он установил стеклянную призму (см. рис. 1 на цвет. табл. у стр. 176). Пучок света в призме «переломился», и на экране появилась цветная полоса. Эту полосу ученый назвал спектром. С помощью второй призмы Ньютону удалось из цветного спектра получить опять белый свет.

В другом опыте Ньютон поставил между отверстием в ставне и стеклянной призмой экран с узкой щелью. Перемещая щель, можно было направлять на призму различные одноцветные пучки: синие, зеленые, желтые, красные. Оказалось, что больше всего отклоняются призмой фиолетовые лучи и меньше всего — красные. Одноцветный луч не разлагается призмой на другие цвета. Такой луч называется монохроматическим, т. е. одноцветным.

Вывод из этих опытов был ясен: белый свет состоит из множества цветных лучей.

Световые лучи преломляются призмой по-разному, в зависимости от цвета (точнее, в зависимости от длины волны).

Благодаря этому и возникает спектр.

Преломляясь в дождевых каплях, белый свет разлагается на лучи разных цветов спектра. Так была объяснена Ньютоном радуга.

## ОТКРЫТИЕ МАКСВЕЛЛА

В 60-х годах прошлого столетия английский физик Джемс Клерк Максвелл предложил теорию электромагнитных колебаний (см. ст. «Электромагнитное поле»). На основании этой теории была вычислена скорость распространения таких колебаний в пустоте. Оказалось, что скорость электромагнитных колебаний не зависит от длины их волн и равна скорости света. Максвелл предположил, что свет — также электромагнитные колебания, т. е. периодические изменения электрического и магнитного полей в пространстве. А лучи различного цвета отличаются лишь частотой колебаний магнитного и электрического полей или длиной волны этих колебаний.

Частота колебаний световых волн зависит от их длины:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}.$$

В этой формуле $\nu$ — частота колебаний волны, $\lambda$ — ее длина, а $c$ — скорость света.

Предлагаем вам самим, пользуясь этой формулой, проверить, соответствует ли в нижеприведенной таблице длина волны ее частоте у каждого из цветов видимого спектра.

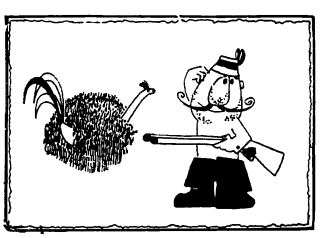
| Частота в 1000 млрд. колебаний в *сек* | Длина волны в микронах | Цвет |
|---|---|---|
| 460 | 0,65 | красный |
| 490 | 0,61 | оранжевый |
| 530 | 0,57 | желтый |
| 580 | 0,52 | зеленый |
| 625 | 0,48 | голубой |
| 670 | 0,45 | синий |
| 730 | 0,41 | фиолетовый |

### Как запомнить?

**Ученики старой гимназии, чтобы лучше запомнить порядок расположения цветов в солнечном спектре, придумали забавное изречение:**

**Каждый (красный)**
**охотник (оранжевый)**
**желает (желтый)**
**знать (зеленый),**
**где (голубой)**
**сидят (синий)**
**фазаны (фиолетовый).**

**Пожалуй, кое-кому из вас это «мудрое» правило может оказаться полезным.**



## ВОЛШЕБНЫЙ ПРИБОР

В 1868 г. было солнечное затмение. Наилучшие условия для наблюдения солнечной короны были, по вычислениям астрономов, в Индии. Именно туда поехал французский астроном Жюль Жансен. Кроме обычных оптических приборов, он решил использовать для наблюдений и **спектроскоп**, изобретенный еще в 1859 г. С помощью спектроскопа Жансен исследовал протуберанцы — оранжево-красные языки пламени, вырывающиеся с поверхности Солнца. В них он обнаружил неизвестный на Земле элемент — «солнечное вещество». Одновременно с Жансеном тот же элемент открыл в солнечной короне и англичанин Норман Локьер.

Новый элемент был открыт на расстоянии 150 млн. *км* от наблюдателей! Назвали его гелием (от греческого слова «гелиос» — солнце). Лишь спустя 27 лет этот элемент был найден и на Земле. Его получил из минерала клевеита английский химик Уильям Рамзай.

## УСТРОЙСТВО СПЕКТРОСКОПА

Ньютон применил для анализа света призму. Метод анализа спектров усовершенствовал в прошлом столетии немецкий физик Густав Кирхгоф. Он создал первый спектроскоп. С помощью этого прибора было совершено немало выдающихся открытий. Главной деталью спектроскопа осталась призма.

Если световой луч падает на плоскую грань призмы (рис. 2 на цвет. табл. у стр. 176), т. е. на границу раздела двух сред (воздуха и стекла), под углом $\alpha$, то какая-то часть света отразится, а другая часть войдет в стекло и преломится в нем, т. е. изменит свое первоначальное направление. При этом все три луча — падающий $A$-$A$, отраженный $Б$-$Б$ и преломленный $B$-$B$ — лежат в одной плоскости с перпендикуляром, опущенным на грань призмы в точку падения луча $A$-$A$. Углы $\alpha$ и $\beta$ связаны зависимостью:

$$\sin \alpha = n \sin \beta.$$

Преломляемость лучей света характеризуется показателем преломления $n$. Для лучей с разной длиной волны преломляемость разная. Этим законом определяется ход лучей в призме.

Лучи света с разной длиной волны призма спектроскопа отклоняет на разные углы. Если на призму падает луч, представляющий собою смесь желтого и зеленого монохроматических излучений, то желтая часть луча будет отклонена призмой меньше, чем синяя. При этом цвет падающего луча будет зеленым. У каждого сорта стекла свой **показатель преломления** для лучей с волнами определенной длины. На основании этого рассчитывается ход лучей в призме спектроскопа.

Например, у сорта стекла К-8 показатель преломления для лучей синего цвета $n = 1{,}522$ ($\lambda = 0{,}486$ *мк*), для лучей желтого цвета $n_D = 1{,}516$ ($\lambda = 0{,}589$ *мк*). На рисунке 4 цветной таблицы у страницы 176 показана оптическая схема простейшего спектроскопа. Труба $D$ называется **коллиматором**. Перед ее щелью $A$ установлен источник света, спектр которого должен быть изучен. Свет пламени будет выходить из коллиматора почти параллельным пучком, или, как говорят, пучком малой расходимости. На расстоянии $f$ от щели $A$ расположена двояковыпуклая линза $L$ — кусок стекла, поверхность которого образована частями сферы. В просторечии такую линзу называют **увеличительным стеклом**.

На рисунке 7 изображена двояковыпуклая линза. Ось $A$-$A$, перпендикулярная к поверхностям линзы и проходящая через ее центр, называется главной оптической осью. Если на линзу бросить пучок параллельных лучей света, то все они соберутся в одном малом пятышке $F$, которое можно принять за точку. Эта точка называется **фокусом линзы**. Плоскость, проходящая через фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси, называют **фокальной плоскостью**. Если параллельный пучок падает на линзу под углом $\alpha$ к оси $A$-$A$, то он соберется в точке $B$ фокальной плоскости. Угол $BOF$ будет равен углу $\alpha$. Если в точках $B$ и $F$ поместить точечные источники света, то их лучи

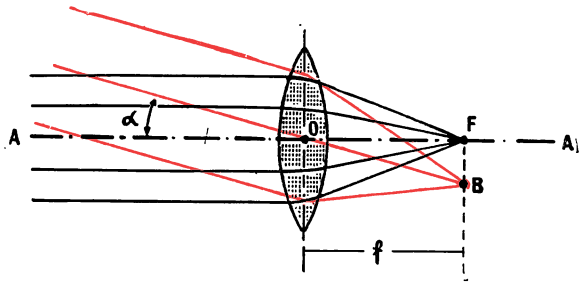



**Рис. 7. На линзу спектроскопа падают под разными углами параллельные цветные пучки света. В фокальной плоскости этой линзы цветные изображения щели *A* лежат в различных местах.**

выйдут из линзы параллельными пучками, угол между осями которых равен $\alpha$.

Вернемся к оптической схеме спектроскопа (рис. 2 на цвет. табл. у стр. 176). Щель коллиматора $A$ расположена в фокальной плоскости линзы $L_1$. Эта щель, как правило, должна быть очень узкой. Если перед щелью помещены два источника света — желтого ($\lambda = 0{,}589$ *мк*) и синего ($\lambda = 0{,}470$ *мк*), то световые пучки, пройдя через призму, дадут в фокальной плоскости линзы $L_2$ два изображения щели — желтое и синее. Их можно увидеть, если в фокальной плоскости $B$-$B$ поставить матовое стекло. Между главной оптической осью линзы $L_2$ и осями этих световых пучков образуются различные углы: для желтого цвета — угол $\alpha_1$, для синего — угол $\alpha_2$.

В спектроскопе матовое стекло не ставят, а рассматривают спектр через дополнительную линзу — **окуляр**. Эта линза дает увеличенное изображение спектра и позволяет изучать его детали.

Ньютон разложил белый свет очень просто, без каких-либо дополнительных линз, потому что у него был очень интенсивный источник света — Солнце. В яркий солнечный день освещенность примерно в тысячу раз больше, чем освещенность, которую создает лампа накаливания мощностью в 100 *вт* на расстоянии 1 *м*. Солнечные лучи падают на Землю почти параллельным пучком, расходимость такого пучка всего 30′. Значит, у Ньютона не было необходимости создавать параллельный пучок и линза $L_1$ была ему не нужна. Ньютон мог отнести экран на большое расстояние. За счет этого разноцветные пучки света в его опыте хорошо разделялись; правда, уменьшалась освещенность экрана, но с таким ярким источником света, как Солнце, это не играло роли. Поэтому не нужна ему была и линза $L_2$. Источники света, с которыми обычно имеют дело современные исследователи, во-первых, дают пучки большой расходимости (за исключением звезд, свет которых анализируют спектроскопом), а во-вторых, их яркость ничтожна по сравнению с яркостью Солнца.

## КАК СПЕКТРОСКОП ОБНАРУЖИВАЕТ ХИМИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ

Поставим перед щелью $A$ коллиматора газовую горелку (рис. 4 на цвет. табл. у стр. 176). Введем на платиновой проволочке в ее почти бесцветное пламя поваренную соль — соединение натрия с хлором (NaCl). В окуляре спектроскопа мы увидим две очень близкие друг к другу желтые линии — два изображения щели $A$. Эти же линии и точно на том же месте появятся, если в пламя вводить другие соединения натрия. Такое совпадение доказывает, что эти линии принадлежат именно натрию.

Поставим перед щелью разрядную ртутную лампу. В поле зрения окуляра появится множество разноцветных линий, из них две особенно яркие: зеленая ($\lambda = 0{,}546$ *мк*) и желтая ($\lambda = 0{,}577$ *мк*). Эти линии принадлежат ртути. Внесем в пламя горелки соль калия, пламя

### Теория и практика

**Американский физик Роберт Вуд в конце прошлого столетия учился в одном из американских университетов. Жил он в то время, как и большинство студентов, в частном пансионе. У студентов появилось подозрение, что хозяйка пансиона добавляет в котлеты оставшиеся после завтрака недоеденными куски мяса. Однажды Вуд положил за завтраком**

**в оставшийся на тарелке кусочек мяса немного соли лития. А вечером Вуд проделал опыт над кусочком котлеты, поданной на обед. Он поместил его в пламя горелки, установленной перед коллиматором спектроскопа. В поле зрения окуляра появилась красная линия лития. А в обычном мясе лития никогда не бывает. Подозрения студентов подтвердились!**

окрасится в фиолетовый цвет, а в спектроскопе мы увидим красную и фиолетовую линии. Светящиеся пары каждого химического элемента излучают только ему одному присущий свет, который состоит из набора монохроматических излучений. Такое монохроматическое излучение мы в дальнейшем будем называть **спектральной линией**. Итак, светящиеся пары каждого элемента излучают серию вполне определенных спектральных линий — **линейчатый спектр**.

Спектральные линии всех элементов собраны в таблицы, где указаны длины всех волн соответствующих им серий. Если в пламя горелки внести неизвестное химическое соединение, то по спектральным линиям, появившимся в поле зрения спектроскопа, мы, пользуясь таблицами, безошибочно определим химический состав этого соединения. Такой способ анализа веществ оказался очень быстрым и, главное, весьма чувствительным. Одной десятимиллиардной грамма соли калия достаточно, чтобы обнаружить его среди других элементов.

С помощью спектроскопа немецкие ученые Кирхгоф и Бунзен обнаружили в минерале карналлите красную и синюю спектральные линии. Их нельзя было приписать ни одному из изученных к тому времени элементов. Исследователи предположили, что имеют дело с какими-то еще неизвестными элементами. И действительно, Бунзену удалось выделить из карналлита новые элементы: рубидий (красная линия) и цезий (голубая линия).

## СОЛНЕЧНАЯ ЗАГАДКА

Немецкий оптик Йозеф Фраунгофер в 1821 г. заменил призму в спектроскопе **дифракционной решеткой** — устройством, которое гораздо сильнее разделяет световые лучи, чем призма. На щель такого усовершенствованного спектроскопа Фраунгофер направил солнечный свет. К своему удивлению, он различил в сплошном спектре Солнца десятки черных полосок. В честь его эти полоски теперь называются **фраунгоферовыми линиями**.

Много времени прошло после этого открытия, прежде чем физики разгадали секрет фраунгоферовых линий. Мы не будем подробно описывать этот путь, а изложим, как в наше время наука объясняет фраунгоферовы линии в спектре.

Свет лампы накаливания дает в окуляре спектроскопа непрерывный сплошной спектр. Но если на пути этого света окажутся пары какого-то вещества, в спектре появятся темные полосы. Например, поставим перед щелью $A$ спиртовку, а в спирте растворим немного поваренной соли (рис. 4 на цвет. табл. у стр. 176). Сквозь пламя спиртовки направим в щель свет электрической лампы накаливания. В сплошном спектре на том месте, где должны быть линии натрия, появятся две темные полоски. Пары натрия поглотили из света лампы как раз те участки волн, которые они сами излучают (рис. 5 на цвет. табл. у стр. 176).

Темные полосы появились потому, что свет лампы, проходящий в спектроскоп, намного интенсивнее, чем свет горелки. Хотя на участки спектра $D_1$ и $D_2$ от пламени горелки по-прежнему падает столько же света, они кажутся темными на фоне яркого сплошного спектра. Если лампу выключить, казавшиеся темными линии натрия опять приобретут свой обычный цвет. Спектр с темными полосами, характерными для определенного элемента, называется **спектром поглощения** этого элемента.

**Сплошной спектр** дают жидкости и раскаленные твердые тела. Солнце, по существу, раскаленная жидкость и потому испускает непрерывный спектр. Видимая нами поверхность Солнца — **фотосфера** — окружена газовой оболочкой — **хромосферой**. Температура хромосферы такова, что все элементы в ней находятся в виде паров. Фотосфера излучает свет со сплошным спектром, а хромосфера поглощает излучения, соответствующие спектру поглощения тех элементов, пары которых в ней присутствуют.

## АБСОЛЮТНО ЧЕРНОЕ ТЕЛО

Каждое тело, даже светящееся, в той или иной мере поглощает свет. Наибольшей способностью поглощения обладают тела, окрашенные в черный цвет. Почти полностью поглощает свет сажа. От поверхности, покрытой сажей, отражается только сотая доля света, упавшего на нее.

Тело, которое поглощает целиком все падающие на него лучи, называется а б с о л ю т н о ч е р н ы м т е л о м. Скажем сразу: в природе таких тел не бывает. Однако можно создать прибор, излучательные свойства которого очень близко подходят к абсолютно черному телу. Этот прибор представляет собой полость с отверстием (рис. 8). Попав в отверстие $a$, луч света многократно отражается от черных стенок полости и практически полностью погло-

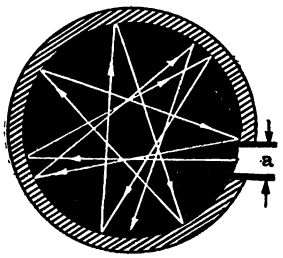



Рис. 8.

тится. Отверстие *a* и есть абсолютно черное тело.

Но если черное тело, в том числе и абсолютно черное, не отражает падающие на него лучи, это совсем не значит, что оно вообще не излучает никаких лучей. Происходит как раз обратное: единица поверхности абсолютно черного тела излучает энергии больше, чем такая же единица поверхности любого другого тела, нагретого до такой же температуры (рис. 9).

Чтобы понять, как излучают энергию раскаленные тела, нужно знать, как ее излучает абсолютно черное тело.

**Рис. 9. Темные и светлые предметы по-разному излучают свет при различной температуре: *а*) фарфоровая тарелка с темным узором при комнатной температуре, *б*) та же тарелка, нагретая до высокой температуры; «темные» места теперь светятся ярче «светлых». Светлые места и при комнатной температуре излучают меньше, чем темные, но зато они сильнее отражают свет других источников.**

## КАК ИЗМЕРИЛИ ТЕМПЕРАТУРУ СОЛНЦА

Спектр любого твердого тела, нагретого до любой температуры, можно измерить **спектрометром**. Этот прибор представляет собой слегка измененный спектроскоп.

В фокальной плоскости линзы $L_2$ установлена пластина с узкой вертикальной щелью $B$ (рис. 2 на цвет. табл. у стр. 176). Если трубу $D$ поворачивать вокруг вертикальной оси, то через щель $B$ будет проходить свет только узких участков сплошного спектра. Перед щелью $A$ коллиматора установлена лампа накаливания, а за щелью $B$ — **болометр**: очень тонкая, зачерненная металлическая полоска, которая одинаково поглощает световые лучи с любой длиной волны.

Чем больше энергии излучения поглощает болометр, тем сильнее он нагревается и тем больше становится его электрическое сопротивление. Электрическое сопротивление болометра легко измерить и тем самым определить, какую энергию испускает нить лампы в различных участках спектра.

Попытаемся построить график, в котором будет отражено, как зависит энергия, излучаемая 1 $см^2$ абсолютно черного тела, от длины волны (рис. 10). В излучении абсолютно черного тела невозможно обнаружить энергию, соответствующую излучению волны со строго определенной длиной. Поэтому приходится измерять энергию излучения в каком-то узком участке спектра, например в диапазоне от $\lambda_1$ до $\lambda_2$. Если эту энергию разделить на ширину участка $\lambda_2 - \lambda_1$, то определится излучательная способность $\varepsilon_\lambda$ абсолютно черного тела для волны длиной $\lambda$, лежащей между волнами $\lambda_1$ и $\lambda_2$.

Отложим значение $\varepsilon_\lambda$ по оси ординат, а по оси абсцисс — длину волны $\lambda$. Получим кривую с максимумом.

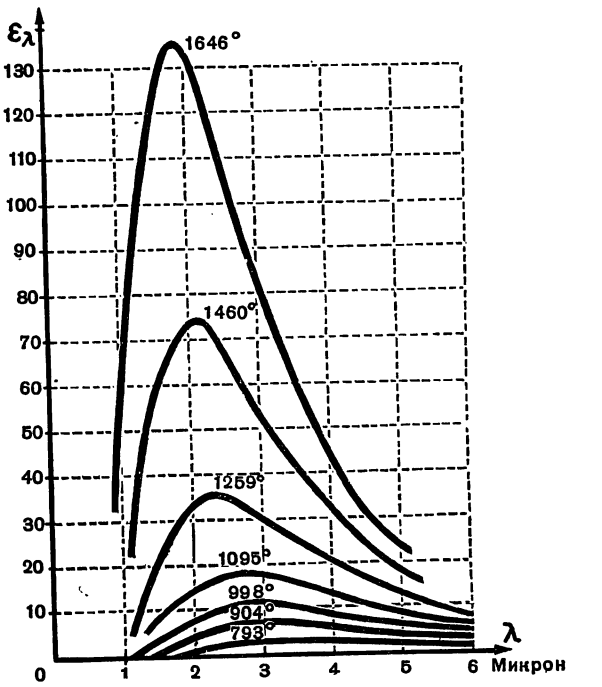



**Рис. 10. Зависимость излучательной способности $\varepsilon_\lambda$ абсолютно черного тела от длины волны излучения (для разных его температур).**

Предположим, мы построили график зависимости (рис. 11) для тела, нагретого до 6000° К (фотосфера Солнца). Самое большое значение $\varepsilon_\lambda$ будет при длине волны $\lambda_m = 0{,}5$ *мк*. В обе стороны от этой точки регистрируемая в спектрометре энергия будет убывать. Будем двигаться к красной границе солнечного спектра. Уже в области 0,7—0,75 *мк* красный цвет переходит в темноту. Но и в темных участках болометр будет показывать, что энергия продолжает поступать. Значит, на красной границе спектр Солнца не

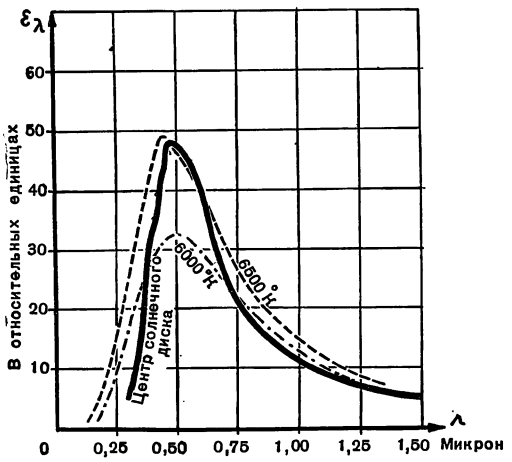



**Рис. 11. Распределение энергии в спектрах Солнца и абсолютно черного тела при 6000° К и 6500°К.**

заканчивается, хотя излучения с длиной волны больше 0,75 *мк* человеческий глаз не воспринимает.

Здесь начинаются невидимые **инфракрасные лучи** — инфракрасная область оптического спектра. Инфракрасное излучение примерно в области 500 *мк* переходит в диапазон радиоволн (см. ст. «Радио»).

То же происходит и на другом конце спектра. За фиолетовыми лучами в области волн в 0,4 *мк* начинается невидимое **ультрафиолетовое излучение**, которое где-то около волн в 0,002 *мк* переходит в рентгеновские лучи (см. цвет. табл. у стр. 177). Спектральные области наиболее коротких ультрафиолетовых лучей и наиболее длинных рентгеновских лучей накладываются друг на друга.

Инфракрасную область света излучают спектрометром, призма которого изготовлена из кристалла каменной (поваренной) соли. Даже специальные сорта стекла (тяжелый флинт) полностью поглощают инфракрасное излучение, начиная с волн длиной в 2,7 *мк*. А каменная соль пропускает это излучение с длиной волны до 13,5 *мк*. В инфракрасном спектрометре вместо линз поставлены вогнутые металлические зеркала, хорошо отражающие инфракрасные лучи.

Ультрафиолетовое излучение исследуют с помощью оптических деталей из кварца или флюорита. Кварц слабо поглощает это излучение до волны в 0,18 *мк*, а флюорит — до 0,12 *мк*.

Поместим перед спектрометром с призмой из каменной соли абсолютно черное тело, у которого температура внутренних стенок полости равна 100° Ц. Такое тело не светится даже в полной темноте, но болометр, установленный у выходной щели спектрометра, позволяет и в этом случае определить зависимость $\varepsilon_\lambda$ от длины волн. Максимум излучательной способности тела, нагретого до 100°Ц, соответствует длине волны в 7,8 *мк*. Опыты показали: чем выше температура полости, тем короче должна быть длина волны $\lambda_m$ (рис. 10). Величина $\lambda_m$ как бы смещается с ростом температуры в сторону более коротких волн.

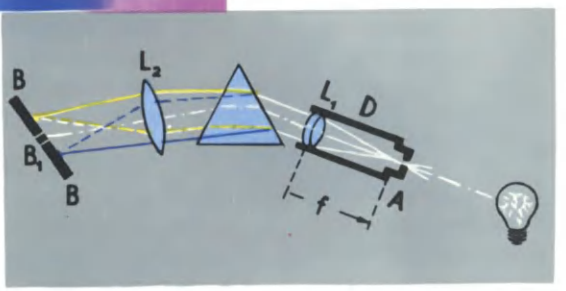
В результате этих опытов и некоторых теоретических соображений немецкому физику Вильгельму Вину удалось вывести формулу, которая теперь называется **законом смещения Вина**: $\lambda_m T = 2897$ *мк*·°К. Если в эту формулу подставить $\lambda_m$ в микронах, определится величина $T$ — температура излучающего нагретого тела в градусах Кельвина. С помощью спектроскопа можно измерить температуру любого тела, даже температуру Солнца или звезды.

Иначе, как с помощью спектрометра, узнать температуру Солнца невозможно. Нельзя же установить на Солнце термометр! Но, допустим, мы как-то добыли кусочек Солнца. Из какого же материала сделать термометр? Даже самый тугоплавкий металл — вольфрам плавится при 3000°К. Поэтому температуру Солнца можно определить только измерением $\lambda_m$. Так же определяется температура звезд, а в земных условиях — температура сильно нагретых тел, например раскаленной плазмы (см. ст. «Сто миллионов градусов»).

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ КАТАСТРОФА

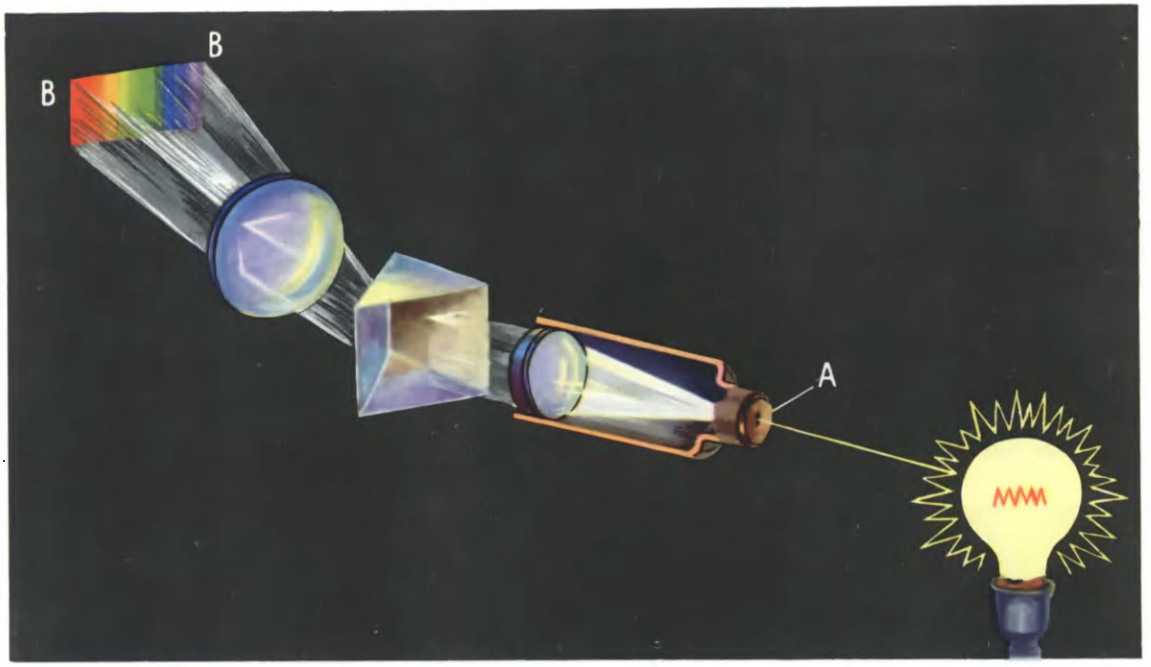
В конце XIX века считалось твердо установленным, что нагретое твердое тело излучает непрерывные световые волны, теоретические расчеты показывали: в этом случае излучательная способность нагретого твердого тела $\varepsilon_\lambda$

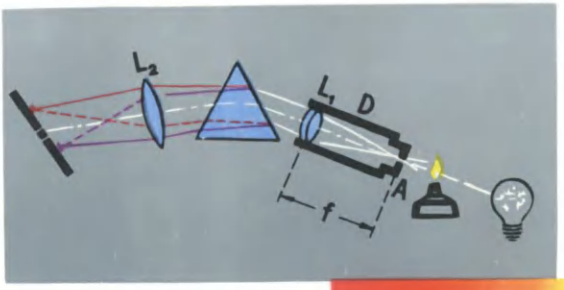
3




2

1




4

5

*Таблица к статье „Свет“*

Спектры. *1*. Схема спектроскопа (на рисунке нет линзы, которая обычно ставится между источником света и щелью *A*, чтобы собрать на щель больше света). *2*. Ход световых лучей через оптическую систему спектроскопа. *3*. Сплошной спектр. *4*. Световые лучи перед тем, как войти в щель $A_1$, проходят через пламя горелки, окрашенное парами какого-либо химического элемента. *5*. Линейчатый спектр натрия.

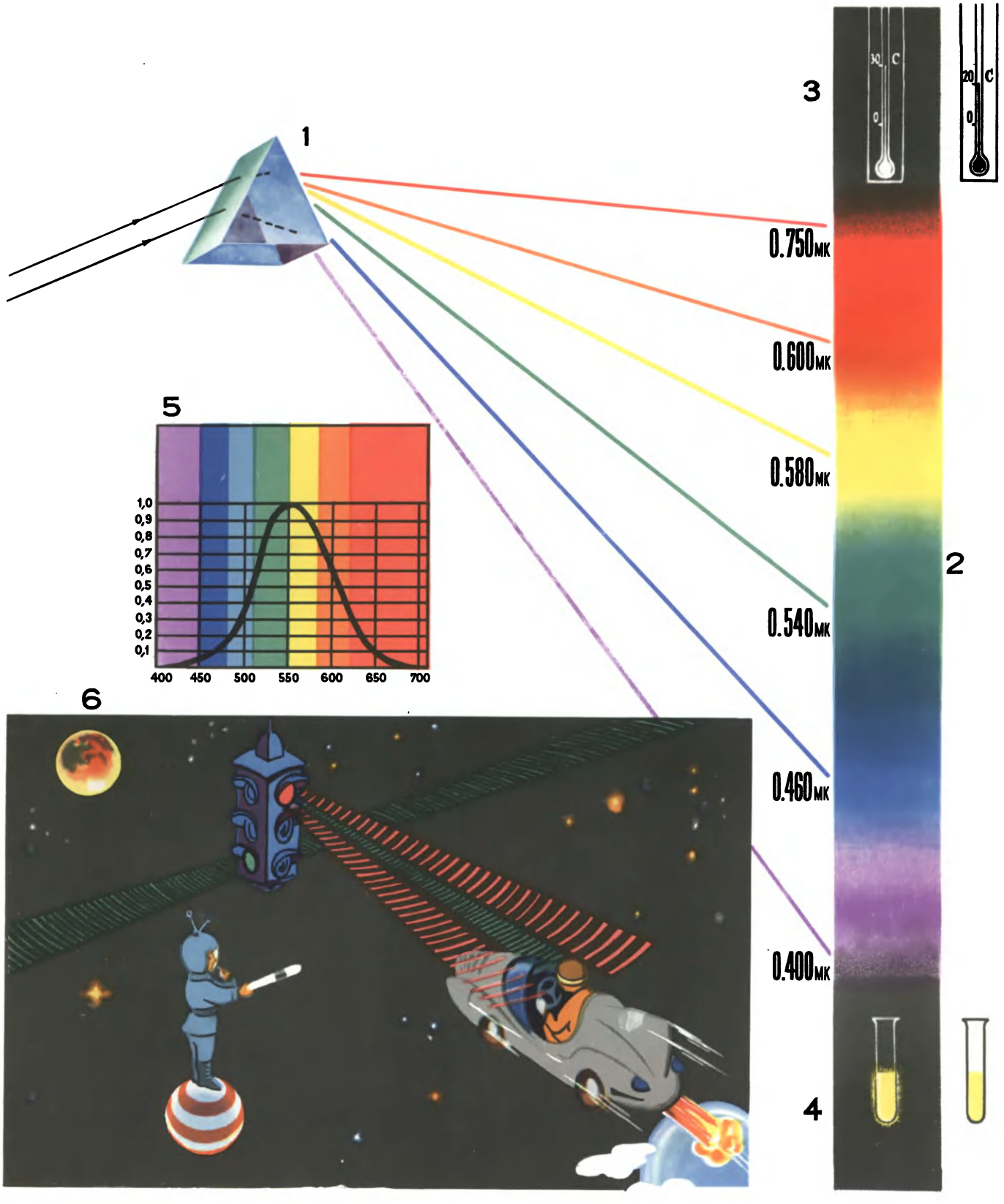



*Таблица к статье „Свет"*

Физические свойства световых лучей. *1.* Призма. *2.* Сплошной спектр с указанием длины волн каждого цвета. *3.* Инфракрасные лучи обладают тепловыми свойствами, в данном случае повышают температуру градусника. *4.* Ультрафиолетовые лучи обладают химическими свойствами, в данном случае вызывают свечение люминофора. *5.* Кривая видимости лучей невооруженным глазом; по оси абсцисс отложены длины волн в миллимикронах, по оси ординат — соответствующие интенсивности лучей. *6.* Эффект Доплера.

в ультрафиолетовой части его спектра должна была бы беспредельно возрастать. Это резко противоречило опыту. Не могла классическая физика объяснить, например, и такой простой факт: почему остывающая печь не светится желтым светом? К концу прошлого века ученые стали в тупик перед явлениями, связанными с изучением нагретых твердых тел. Такое положение было образно названо «ультрафиолетовой катастрофой».

Опытную зависимость $\varepsilon_\lambda$ от длины волн и температуры удалось объяснить в 1900 г. немецкому физику Максу Планку. Для этого ему пришлось допустить, что свет излучается не как непрерывная волна, а отдельными порциями, которые он назвал **квантами**. Энергия кванта равна $h\nu$, где $h$ — **постоянная Планка**, величина, равная $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг/сек*, а $\nu$ — частота излучения. Ни одно тело не может передать другому телу энергию меньше кванта.

Гипотеза Планка положила начало **квантовой механике**, которая стала основой современной теоретической физики. Кстати, только очень сложная квантовая теория Планка объяснила, как излучает нагретая печь.

## ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

Свет, поглощаясь в веществе, передает ему свою энергию в виде тепла. Но оказывает ли световой поток механическое воздействие на тела, которые он освещает?

Великий астроном Иоганн Кеплер еще в 1604 г. объяснил форму хвоста кометы влиянием светового давления. Но доказать это удалось лишь 250 лет спустя английскому физику Максвеллу. Он вычислил величину светового давления, исходя из своей теории электромагнитного поля.

Если на единицу площади тела за одну секунду падает и полностью поглощается им световая энергия $E$, то световое давление $q$ равно $\frac{E}{c}$. Когда же свет полностью отражается, то

$$q = \frac{2E}{c}.$$

Представим себе свет, падающий на какую-то отражающую поверхность, как поток частиц — **фотонов**. Фотоны ведут себя как обычные мячики: они отскакивают от этой поверхности. Говоря языком теоретической механики, вектор количества движения $p$ фотона меняет свое направление на противоположное. Полное изменение $\Delta p$ этого вектора равно $2p$. Величина $\Delta p$ равна давлению $q$ на поверхность, если на единицу площади этой поверхности каждую секунду падает один фотон.

Сравним полученный результат с формулой Максвелла. По этой формуле $q = \frac{2E_\phi}{c} = 2p$, если на поверхность падает в секунду один фотон с энергией $E_\phi$. Из предыдущей формулы следует: $E_\phi = pc$, где $p$ — количество движения фотона. Но количество движения частицы равно ее массе, умноженной на скорость, а скорость фотона — это скорость света $c$. Значит, энергия фотона $E_\phi = m_\phi c^2$. Если этот вывод обобщить на любую частицу массы $m$, то $E = mc^2$!

По формуле Максвелла можно подсчитать, что в полдень лучи Солнца действуют на 1 $м^2$ земной поверхности с силой около 0,00039 *н*. Но физики долгое время не могли измерить световое давление практически. Это оказалось

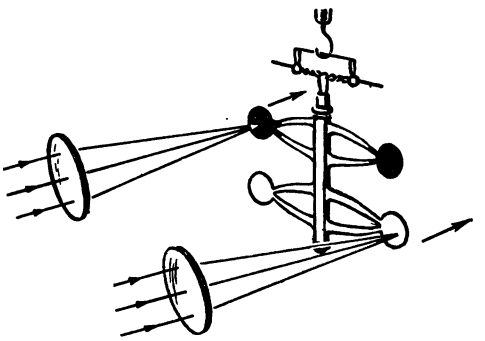


**Рис. 12. Схема опыта П. Н. Лебедева.**

слишком сложным. Многие ученые стали сомневаться в полученных Максвеллом результатах.

Впервые удалось доказать опытным путем, что световое давление существует, русскому физику П. Н. Лебедеву в 1899 г. Он подвесил в вакууме на тонкой нити пару крылышек; одно из них было черным, другое — блестящим (рис. 12). Свет почти полностью отражался от блестящего крылышка и оказывал на него давление, на черное крылышко давление было вдвое меньшим. Это соответствовало и теории Максвелла. Такое превышение давления оказалось достаточным, чтобы закручивать нить. По углу поворота крылышек можно определить силу, действующую на блестящее крылышко, а значит, и давление света.

Опыт кажется простым. Но такое впечатление обманчиво. До Лебедева попытки измерить световое давление не удавались, потому что

конвекция (перенос тепла движущейся средой) газов и другие физические явления оказывали помехи, в тысячи раз превышавшие световое давление. Физик Томсон так определил значение этого опыта: «Я всю жизнь воевал с Максвеллом, не признавал его световое давление, и вот опыты Лебедева заставили меня сдаться».

Интересное явление открыто в последние годы. У Земли обнаружился газовый шлейф, направленный в сторону от Солнца. Этот шлейф создается давлением солнечного света на газ в верхних слоях атмосферы.

## В ГЛУБЬ АТОМА

Линейчатый спектр состоит из серий полосок разного цвета. Физики тщательно зарегистрировали все эти серии, составили из них каталоги и, взглянув на спектр, легко находят, какому элементу он принадлежит. Но очень долго ученые не могли найти закономерности, по которым эти серии построены.

Поставим, например, перед щелью спектрографа колбу, наполненную водородом, заставим этот газ светиться. Сделать это не так уж трудно. В колбу впаяны металлические электроды, и достаточно подвести к ним электрическое напряжение, как водород засветится голубоватым цветом. Если в плоскости *B-B* установить при этом фотопластинку, а потом проявить ее, обнаружится ряд линий линейчатого спектра: $H_\alpha$, $H_\beta$, $H_\gamma$, $H_\delta$ ... Волны, соответствующие этим линиям, имеют длину 0,656; 0,486; 0,434 и 0,410 *мк*.

Ученые искали: существует ли зависимость между этими величинами? Существует ли зависимость в системе линий линейчатого спектра любого другого химического элемента?

Швейцарский учитель Бальмер был убежден, что во всем в природе царит порядок и гармония. Поэтому он считал, что спектральные линии не могут располагаться хаотично. После долголетних поисков он в 1885 г. эмпирически нашел связь между спектральными линиями. Он вывел формулу для линий водорода. А пять лет спустя немецкий физик Иоганн Ридберг придал этой формуле современный вид:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Величина $R$ была потом названа **постоянной Ридберга**. $R = 109\,677{,}581\ см^{-1}$. Чтобы получить длину волны какой-нибудь из линий спектра, например $H_\alpha$, $H_\beta$, $H_\gamma$ или $H_\delta$, в формулу Бальмера нужно подставить одно из значений $m$: 3, 4, 5 или 6. Формула эта дает очень точные результаты. Разница между вычисленными и измеренными длинами волн обнаруживается лишь в сотых долях ангстрема.

| $m$ | Длина волны в Å | |
|---|---|---|
| | вычисленная | измеренная |
| 3 | 6562,80 | 6562,79 |
| 4 | 4861,38 | 4861,33 |
| 5 | 4340,51 | 4340,47 |
| 6 | 4101,78 | 4101,74 |
| 7 | 3970,11 | 3970,07 |

И лишь через 28 лет после того, как Бальмер «угадал» закономерность расположения линий в спектре водорода, датчанин Нильс Бор дал этой закономерности физическое объяснение.

Атом водорода состоит из электрически положительно заряженного ядра — протона и движущегося вокруг него отрицательно заряженного электрона. Чем ближе орбита электрона к ядру, тем меньше у атома запас энергии, потому что чем дальше друг от друга два электрических заряда разных знаков, тем больший у них запас энергии.

Излучив свет, атом из состояния с большей энергией переходит в состояние с меньшей энергией. При поглощении света происходит обратное. По гипотезе Планка, свет излучается квантами. Значит, электрон в атоме может переходить с орбиты на орбиту только скачком.

Нильс Бор предположил, что в атоме водорода существует набор «разрешенных» орбит. Электрон в атоме может двигаться только по этим орбитам. Каждой из орбит соответствует определенная энергия атома водорода, например орбите *3* — энергия $E_3$. Значения $E_n$ называются **уровнями энергии атома**. На рисунке 13 показана схема разрешенных орбит водорода. Если электрон переходит с орбиты *3* на орбиту *2*, то атом излучает энергию $\varepsilon$, которая равна энергии кванта света:

$$\varepsilon = E_3 - E_2 = h\nu.$$

Здесь $h$ — постоянная Планка, а $\nu$ — частота излучения. Физики называют такой процесс излучения переходом атома с энергетического уравня $E_3$ на энергетический уровень $E_2$. Из этого уравнения можно определить частоту колебаний излучаемой световой волны.

Испускает свет или поглощает его атом, электрон при этом переходит с одной разрешен-

ной орбиты на другую, иначе говоря, атом переходит с одного энергетического уровня на другой.

Сравнивая уравнения отдельных переходов $E_m - E_n = h\nu$ с опытными данными, удалось определить энергетические уровни водородного атома. Уровень $E_1$ соответствует наименьшему запасу энергии в атоме и называется основным уровнем. В схему энергетических уровней водородного атома (см. рис. 13) вошли и серии линий, открытые после исследований Бальмера.

Теория Бора — следующий за гипотезой Планка шаг в развитии квантовой механики. Она позволила с большой точностью вычислить постоянную Ридберга. Бор объяснил процессы, происходящие в атоме водорода при излучении. Но объяснить с такой же полнотой излучение более сложных атомов теория Бора не смогла. Это удалось сделать только в 20-х годах, когда квантовая теория была уже достаточно разработана.

Сложные атомы, излучая кванты света, так же как и водородный атом, переходят с одного энергетического уровня на другой. И это, конечно, отражается в их спектрах.

Возьмем, например, атом натрия. В его спектре две близко друг к другу расположенные желтые линии. Схема энергетических уровней натрия показана на рисунке 14. Атом натрия может поглотить не только энергию $E_2 - E_1$, но и $E_3 - E_1$. Следовательно, пары натрия могут поглощать излучения с частотой

$$\nu_1 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad \text{и} \quad \nu_2 = \frac{E_3 - E_1}{h}.$$

Когда энергия атома натрия соответствует уровням $E_2$ или $E_3$, он стремится перейти на основной уровень $E_1$, при этом излучает свет соответственно с частотой колебаний $\nu_1$ либо $\nu_2$. Атом не может ни поглощать, ни излучать свет с другой частотой. Например, в спектре излучения натрия две яркие желтые линии: $D_1$ ($\lambda = 0{,}5896$ *мк*) и $D_2$($\lambda = 0{,}5890$ *мк*); именно на месте этих ярких линий появляются в сплошном спектре темные линии (рис. 5 на цвет. табл. у стр. 176), когда свет лампы накаливания проходит через пламя, подкрашенное солями натрия.

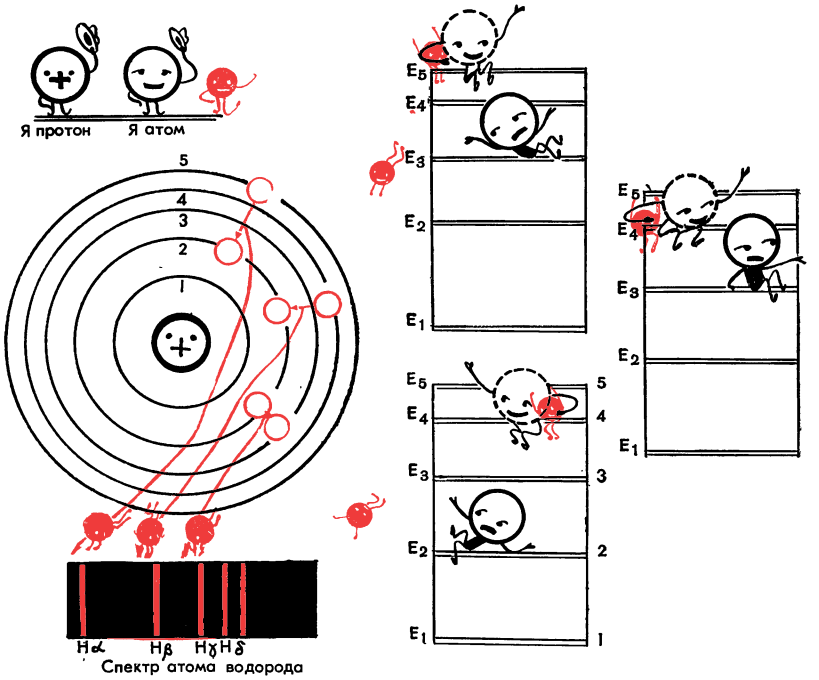



**Рис. 13. Энергетические уровни в атоме.** *Левая* **часть рисунка — схема всех разрешенных орбит в атоме водорода; при переходе электрона с более удаленной на более близкую к ядру орбиту испускается квант света; переход электрона с орбиты на орбиту означает переход атома с одного энергетического уровня на другой. На правой части рисунка показан переход атома с энергетического уровня $E_5$ на уровень $E_3$, переход атома с уровня $E_4$ на $E_2$ и переход атома с уровня $E_4$ на $E_3$; каждый переход электрона с одной орбиты на другую орбиту соответствует определенной линии в спектре водорода.**

## МОГ ЛИ СЖЕЧЬ КОРАБЛИ АРХИМЕД?

Многие тысячи лет назад люди мечтали передавать энергию света на большие расстояния. Из глубины веков дошла до нас легенда о том, как Архимед с помощью зеркал сжег вражеский флот, стоящий на якорях около города Сиракузы. Идею «луча смерти» использовали и современные писатели. В романе Герберта Уэллса

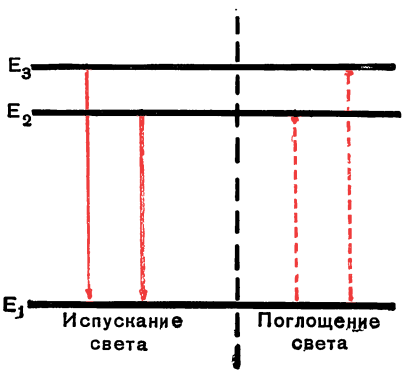



**Рис. 14.**

«Борьба миров» марсиане лучом перерезали линкоры боровшихся с ними англичан. В романе А. Н. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина» так же уничтожается вражеский флот.

Но передача световой энергии на расстояние гораздо важнее для человечества в мирной жизни. Светом можно было бы резать алмазы и тугоплавкие металлы. В определенных условиях могут оказаться незаменимыми оптический телефон, оптический локатор, оптический микрофон.

В большинстве приборов оптической связи важно создать наибольшую освещенность на возможно большем расстоянии. Освещенность поверхности — это поток лучистой энергии, падающий за секунду на единицу площади освещаемой поверхности. Получить большую освещенность на очень далеком предмете — это значит создать на нем высокую концентрацию энергии. Для этого необходим источник света высокой яркости.

Понятие **яркости** самое сложное и самое важное в фотометрии. Рассмотрим две плоские площадки $S_1$ и $S_2$, расположенные перпендикулярно оси $O$-$O$ (рис. 15). За площадкой $S_1$ поместим

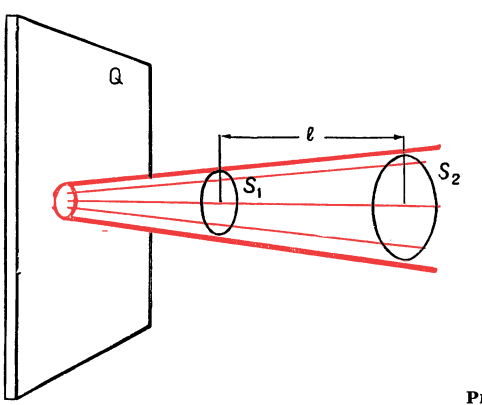



Рис. 15.

светящийся плоский источник $Q$. Световые лучи проходят одновременно через площадки $S_1$ и $S_2$. Объем однородной среды, заполненный световой энергией, ограничен линейчатой поверхностью, т. е. поверхностью, образованной движением прямой линии и этими площадками. Расстояние между $S_1$ и $S_2$ равно $l$. Поток лучистой энергии, проходящий от площадки $S_1$ к площадке $S_2$, пропорционален произведению площадей обеих площадок и обратно пропорционален квадрату расстояния $l$. В самом деле, если $S_2$ удалить от $S_1$ на расстояние в $k$ раз большее, чем $l$, то от площадки $S_1$ на площадку $S_2$ будет падать поток энергии в $k^2$ меньший. Таким образом, поток энергии $\Phi$ равен $\frac{S_1 \cdot S_2}{l^2} B$. В этой формуле $B$ — яркость светового пучка там, где находится площадка $S_1$. Только так можно определить яркость неба, светящегося газа, луча, идущего от лазера, и других источников света, у которых нет определенной светящейся поверхности.

Освещенность $E$, создаваемая любой оптической системой на большом от нее расстоянии $l$, определяется формулой $E = \frac{kBS}{l^2}$. В этой формуле $S$ — площадь линз (или зеркал) оптической системы, $k$ — коэффициент, показывающий, какую часть лучистой энергии пропускает она.

В формуле этой содержится глубокий физический смысл: освещенность на большом расстоянии определяется размером оптической системы и яркостью источника света, причем размеры источника не играют никакой роли. Величина $\frac{S}{l^2}$ не может быть большой, иначе размеры линзы были бы сравнимы с расстоянием, т. е. зеркала или линзы должны были бы быть чрезвычайно громоздкими.

Подсчитаем, например, какова должна быть яркость источника света, чтобы с помощью оптической системы площадью 1 $м^2$ создать освещенность $E$ в 100 раз большую, чем освещенность Земли Солнцем в полдень. Расстояние от источника света — 10 $км$, $S = 1$ $м^2$. Солнечная постоянная — 0,14 $вт/см^2$. Следовательно: $E = 14$ $вт/см^2$.

$$B = \frac{El^2}{S} = 1{,}4 \cdot 10^9 \ вт/см^2.$$

Еще совсем недавно казалось немыслимым получить такую яркость: ведь она примерно в 100 000 раз больше, чем энергетическая яркость Солнца. Поэтому считалось принципиально невозможным создать прибор, который мог бы передавать концентрированный световой пучок на очень большое расстояние.

## ЛАЗЕР

В 1960 г. появился необычайный источник света — **квантовый световой генератор**. Он может испускать лучи в миллиарды раз ярче солнечных. Назван он **лазером**. Это слово составлено из первых букв английского названия генератора: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что в переводе на русский означает — усиление света с помощью вынужденного излучения.

Длина волны света, генерируемого в лазерах различного типа, лежит между 0,25 *мк* и несколькими микронами.

Сначала были созданы лазеры, в которых основной деталью — излучающим телом — был искусственный рубин, размерами и формой напоминающий обычный карандаш. Рубин — это прозрачный, розоватый кристалл $Al_2O_3$ с примесью $Cr_2O_3$. Чтобы понять, почему рубин может быть излучающим телом, надо разобраться в энергетических уровнях его атомов.

На рисунке 16 показана схема энергетических уровней иона хрома $Cr^{+++}$ в розовом рубине. Наименьшей энергии иона хрома соответствует уровень *1*, т. е. уровень его основного состояния. Возбужденным состояниям иона соответствуют уровень *2* и полоса *3*, в которой много энергетических уровней. Облучая кристалл белым светом, можно перевести ионы хрома из основного состояния на один из уровней полосы *3*. Из всей энергии белого света полезно используется в рубине спектральный участок, соответствующий переходам от верхнего до нижнего края полосы *3*. Если бы ширина полосы *3* была незначительна, даже мощному источнику света не удалось бы перевести большое число ионов хрома в состояние *3*.

Из этого состояния ионы хрома в подавляющем большинстве возвращаются в основное состояние через промежуточный уровень *2*. На уровень *2* они переходят с полосы *3*, отдавая кристаллической решетке рубина часть энергии $E_3 - E_2$. Если в состоянии *2* ионы хрома задержатся на какое-то заметное время, то достаточно мощным облучением рубина можно добиться, что на энергетическом уровне *2* будет больше ионов хрома, чем в основном состоянии *1*.

Из энергетического состояния *2* атомы хрома переходят в основное состояние *1*, излучая поток ярко-красного света с длиной волны в 0,6943 *мк*. Частота этого излучения равна $\frac{E_2-E_1}{h}$. Пользуясь формулой $\nu = \frac{c}{\lambda}$ и обозначая $E_2 - E_1$ как $E_{21}$, мы получим $\lambda = \frac{hc}{E_{21}}$.

Это излучение, образующееся в процессе перехода ионов хрома с уровня *2* на уровень *1*, окрашивает рубин в характерный для него красный, рубиновый цвет. Такое свечение называется люминесценцией. Оно распространяется по всевозможным направлениям, и его еще нельзя назвать лазерным излучением. Чтобы рубиновый стержень мог работать как лазер, его торцы *А* и *Б* должны быть параллельными с очень высокой точностью. Современная техника в состоянии обработать кристалл с такой точностью. Торцы *А* и *Б* тщательно отполированы и посеребрены. На торце *Б* толстый слой серебра, он полностью отражает падающий на него свет. На другой торец нанесен тонкий слой серебра, и, так как в очень тонком слое металлы прозрачны, этот торец пропускает некоторую долю падающего на него света.

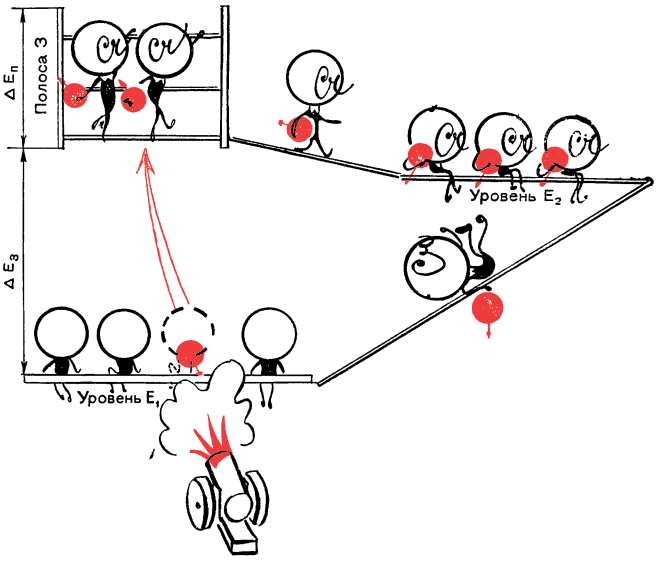



**Рис. 16. Фотоны, испускаемые источником белого света, с энергией от $h\nu_1 = \Delta E_3$ до $h\nu_2 = \Delta E_3 + \Delta E_n$ забрасывают ионы хрома на полосу *3*. С полосы *3* ион хрома переходит на уровень *2*, не испуская свет. Не нужно думать, что ион хрома при этом движется: он находится все время на одном и том же месте в кристаллической решетке рубина. Изменяется только его энергия. С уровня $E_2$ ионы переходят на уровень $E_1$ самопроизвольно или под воздействием пролетающего рядом фотона. В результате этого перехода излучается фотон $h\nu = E_2 - E_1$.**

Рубиновый стержень окружен спиралеобразной импульсной лампой *В* (рис. 17). Эта лампа освещает рубиновый стержень мощным све-

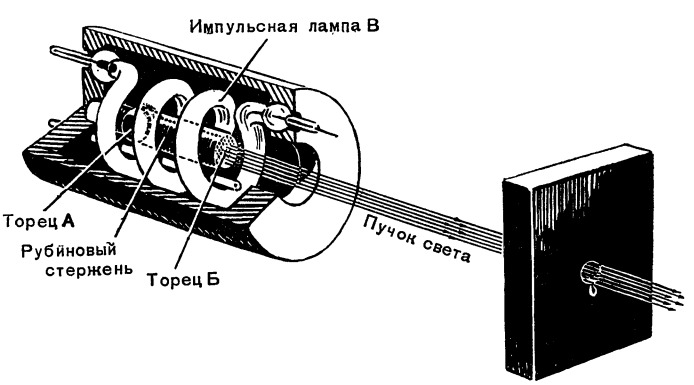



**Рис. 17. Рубиновый лазер.**

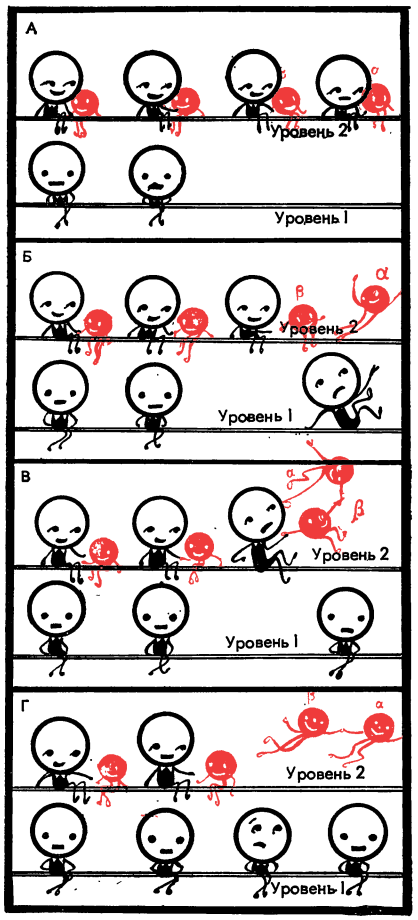



**Рис. 18. Процесс вынужденного излучения у иона хрома: *А* — на уровне *2* накопилось много ионов хрома; *Б* — первый справа ион хрома сам перешел на уровень *1*, испустив при этом фотон; *В* — пролетая мимо другого иона хрома, фотон α «увлекает» за собой фотон β; *Г* — второй ион хрома оказался на уровне *1*.**

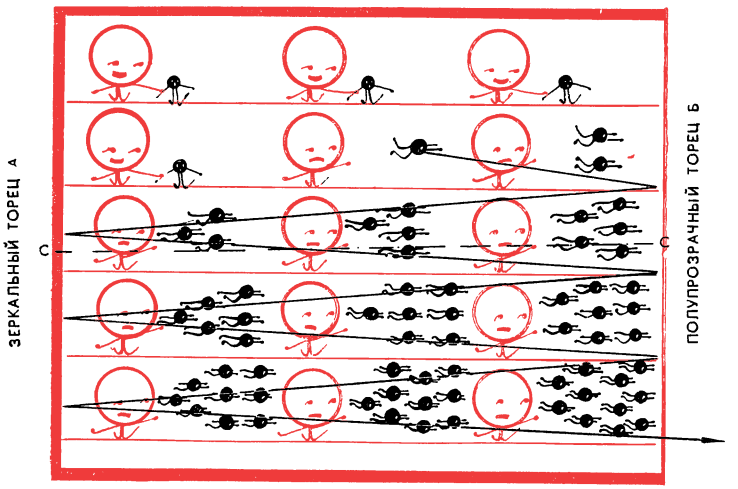



**Рис. 19. Фотоны, выходящие через торец *Б*, на рисунке не показаны. Возбуждение каскада фотонов в лазере.**

товым потоком. Ионы хрома поглощают световую энергию и переходят на уровни полосы *3*, а затем — на уровень *2* (рис. 18). На этом энергетическом уровне накопляется все больше и больше ионов хрома. Сами по себе они сравнительно медленно переходят с уровня *2* на уровень *1*. Но фотоны (кванты) с энергией $E_{21}$ вынуждают эти ионы совершить такой переход. При этом излучается фотон так же направленный и с той же частотой, что и фотон, вызвавший переход. Поэтому, когда на энергетическом уровне *2* находится значительно больше ионов хрома, чем на уровне *1*, возникают каскады фотонов (рис. 19). Фотон, самопроизвольно перешедший с уровня *2* на уровень *1*, увлекает другие фотоны; те, в свою очередь, также увлекают за собой фотоны — каскад нарастает лавинообразно. Направление его может быть самым разным. Все каскады быстро покинут кристалл, кроме того каскада, в котором фотоны движутся параллельно к оси стержня. Эти фотоны будут, не переставая, многократно отражаться от зеркальных торцов: то от торца *А*, то от торца *Б*. Чем точнее выдержана параллельность этих торцов, тем больше отражений совершат фотоны, тем больше света выйдет через торец *Б*.

Двигаясь вдоль оси *С-С*, пучок фотонов вынуждает все новые переходы в ионах хрома. Его мощность непрерывно нарастает. Часть света, вышедшая через торец *Б*, дает световой пучок с очень малой расходимостью и с громадной яркостью. Свет этого пучка практически монохроматичен; ширина его спектральной линии не превышает 0,1 Å.

Мы описали самую простую конструкцию лазера. В исследовательских лабораториях всего мира создаются новые типы квантовых генераторов света. Уже сконструированы полупроводниковые лазеры, в которых электрическая энергия непосредственно преобразуется в световую.

**Пучок лазера в 100 млн. раз ярче пучка солнечного света.** Это значит, что с его помощью можно создавать невиданную концентрацию энергии и передавать ее на очень дальнее расстояние. Лазеры можно применить для связи в космосе. Оценки ученых позволяют заключить, что на космических расстояниях выгоднее осуществлять связь с помощью лазеров, а не радиоволн.

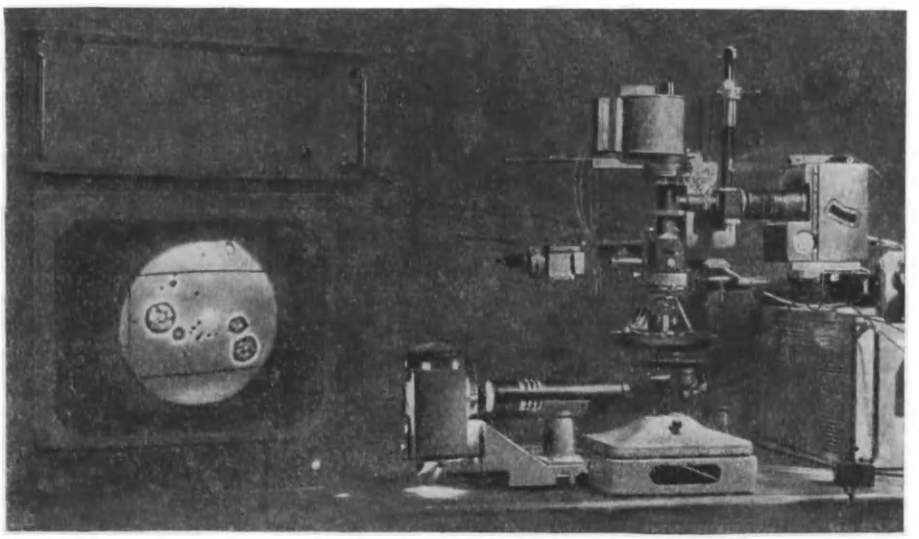
## ПОЮЩИЕ ЭЛЕКТРОНЫ

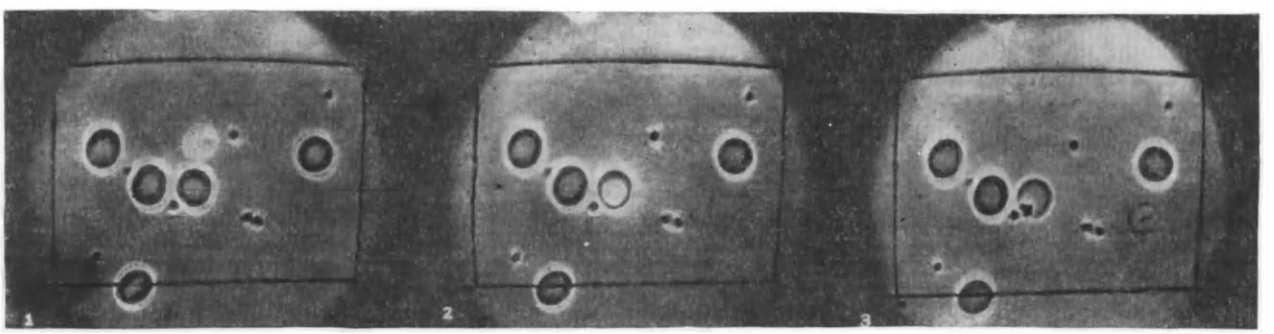
Когда я впервые заглянул в ядерный реактор «плавающего типа», т. е. в реактор, в котором урановые стержни погружены в воду, мое внимание привлекло яркое голубоватое свечение, окружавшее стержни. «Смотри, это черенковское излучение»,— сказал мне товарищ. Это излучение было открыто задолго до пуска первого реактора, в 1934 г. в Ленинграде, советским физиком Павлом Алексеевичем Черенковым.

Атомы разреженных газов и нагретых твердых тел, поглощая какую-либо энергию, например световую, могут переходить в возбужденное состояние и отдавать эту энергию в виде светового излучения. Если от момента поглощения этой энергии атомом до его высвечивания проходит какое-то определенное время, то излучение называется люминесценцией.

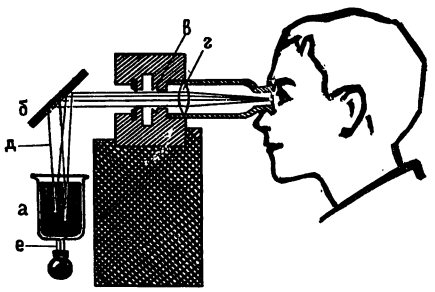
Изучая люминесценцию солей урана под действием γ-лучей радия, Черенков обратил внимание, что так же, хотя и значительно слабее, светится вода, в которой этих солей нет. Сначала он предположил, что свечение происходит за счет находящихся в жидкости примесей. Но контрольные опыты не подтвердили это предположение: под действием γ-лучей одинаково светились любые чистые жидкости. Кроме того, люминесценцию обычно можно «потушить», добавляя в жидкость некоторые соединения, например йодистый калий или азотнокислое серебро. Но излучение, открытое Черенковым, «потушить» не удавалось. Следовательно, это было совсем не люминесценцией. И надо было установить: какова же природа этого излучения?

Гамма-лучи — такие же электромагнитные колебания, как и свет. Только энергия γ-кванта, например, испускаемого радием, превосходит энергию кванта зеленого света в сотни тысяч раз.






**Световой скальпель. На этих замечательных фотографиях, полученных во французском национальном центре переливания крови в Париже, видны красные кровяные тельца, которые ученые изучают с помощью светового луча лазера. *Справа* показана аппаратура, которой они пользуются: телевизионная установка, работающая без выхода в эфир, рубиновый лазер и мощный микроскоп. *Снимок внизу* иллюстрирует изумительную точность, которой добиваются ученые с помощью когерентного светового луча; хирург может воспользоваться таким лучом как микроскальпелем. *1*—Телевизионная камера передает на экран изображения красных кровяных телец, помещенных под микроскоп. Лучом обычного света «нацеливаются» на одно из кровяных телец. *2* — Вспышка света от лазера длительностью около одной тысячной секунды попадает затем в красное кровяное тельце. *3* — При попадании луча лазера тельце меняет цвет и начинает растворяться. Темное пятно в месте проникновения луча образовано, по-видимому, свернувшимся гемоглобином.**




**Установка П. А. Черенкова для измерения яркости свечения жидкостей: *а*) сосуд с жидкостью, *б*) зеркало, *в*) паз для оптического клина, *г*) линза, дающая изображение входной диафрагмы на сетчатку глаза, *д*) свет, *е*) γ-лучи. Луч света ослабляется специальным устройством (оптическим клином), пока глаз исследователя не перестанет его ощущать. По степени ослабления света, необходимой для этого, определяется яркость луча. Опыт проводился в полной темноте.**

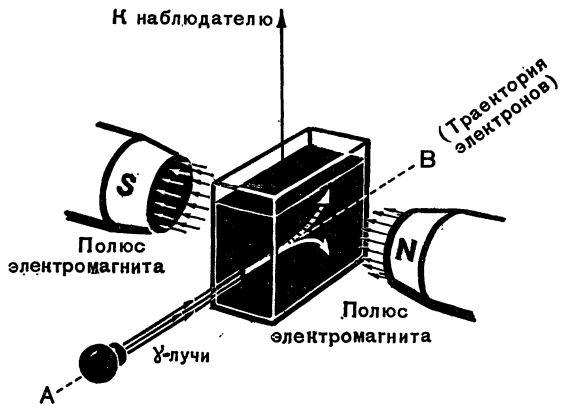



**Рис. 20. Магнитное поле, проходя через жидкость, как показано на рисунке, отклоняет электроны, движущиеся по направлению *AB*, вниз. Свет в основном распространяется вдоль траектории электронов. В глаз наблюдателя попадает минимальное количество света. Если изменить направление магнитного поля, яркость свечения, видимого наблюдателем, возрастет, потому что электроны при этом отклоняются вверх.**

Проходя через вещество, γ-кванты передают его электронам часть своей энергии, и электроны начинают двигаться с большой скоростью. Может быть, таким движением электронов и создается свечение жидкости?

Можно изменить направление движения электронов, например, с помощью магнитного поля. Дальнейшие опыты Черенкова показали, что свечение сильно зависит от направления магнитного поля, пронизывающего исследуемую жидкость (рис. 20). Значит, свечение вызвано электронами. Акад. С. И. Вавилов, руководивший работами Черенкова, предложил объяснить свечение облучаемой жидкости торможением электрического заряда в веществе. Уменьшение скорости заряда изменяет его электромагнитное поле, а изменение поля всегда сопровождается излучением.

Но это предположение не подтвердилось. Расчеты давали величину яркости в сотни раз меньшую, чем опыты. Кроме того, тормозное излучение сильно зависит от атомного номера жидкости, в которой тормозится электрон, а опыты показали, что яркость излучения, открытого Черенковым, не зависит от этого атомного номера. Так ученые убедились, что это свечение — новый, еще неизвестный вид излучения света.

Полет равномерно движущейся пули сопровождается свистом. Пуля «поет», когда летит в воздухе быстрее скорости звука, т. е. со скоростью большей, чем 330 *м/сек*. Если скорость пули меньше 330 *м/сек*, она летит бесшумно (см. статьи «Крылатый полет» и «Звук»).

Обозначим скорость пули и скорость звука буквами $v$ и $u$. Каждая точка траектории пули — источник гармонических колебаний, распространяющихся со скоростью $u$. Из точки $A$ в точку $C$ (рис. 21) звуковые колебания дойдут за время $\frac{l}{u}$, а из точки $B$ — за время $\frac{l_2}{u}$. Но в точке $B$ они возникли позднее на время $\frac{l_1}{v}$. Таким образом, колебания, пришедшие из точки $B$, отстанут от колебаний, пришедших из точки $A$, на время $\tau$:

$$\tau = \frac{l_1}{v} - \frac{l_2}{u} - \frac{l}{u} = l_1\left(\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u}\right).$$

Если $v$ меньше $u$, то колебания, складываясь, погасятся и пуля «петь» не будет. Если же $v$ больше $u$, то фронт звуковой волны будет распространяться под углом $\theta$ к направлению полета пули. Этот угол определится из условия:

$$\frac{1}{v} - \frac{\cos\theta}{u} = 0, \quad \text{или} \quad \cos\theta = \frac{u}{v}.$$

Все это справедливо не только для звуковых волн, но для любых других, в том числе и для

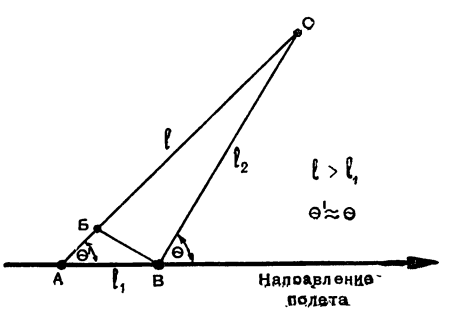



**Рис. 21.**

электромагнитных волн. Когда в веществе движется с постоянной скоростью электрон, то в каждой точке его траектории возникают электромагнитные волны. Если скорость электрона меньше, чем скорость распространения электромагнитных колебаний, то волны в результате интерференции погасятся, так же как и при полете пули в воздухе. Чтобы электроны «пели», т. е. чтобы за счет их движения в веществе генерировался свет, нужно, чтобы скорость их была больше скорости света.

Но ведь скорость света — предел, через который не может перейти никакая движущаяся частица. Да, это так. Но это справедливо только в пустоте. В веществе скорость света равна $\frac{c}{n}$ ($n$ — показатель преломления, $c$ — скорость света в вакууме). Поэтому электрон, получив от $\gamma$-кванта радия достаточную энергию, может двигаться со скоростью большей, чем $\frac{c}{n}$. Гамма-лучи радия разгоняют электрон до 250 000 *км/сек*. Показатель преломления у воды 1,333, следовательно, $\frac{c}{n} = 225\,000$ *км/сек*. Получается, что электрон может двигаться в веществе быстрее, чем распространяется в том же веществе свет.

Так в 1937 г. объяснили свечение Черенкова советские физики И. Е. Тамм и И. М. Франк. Опыты подтвердили все их теоретические выводы. Эта теория помогла выяснить и высчитать многие характеристики излучения: угол излучения электрона к траектории его полета, интенсивность излучения, зависимость излучения от скорости электрона, его спектральный состав.

В наше время эффект Вавилова — Черенкова открыл новые пути в исследованиях процессов, протекающих под действием ядерных частиц с высокой энергией; на его основе созданы, например, регистраторы таких частиц. Физики во всем мире изучают в лабораториях это удивительное излучение.

## КАК ИЗМЕРИЛИ ДЛИНУ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ

Задолго до того, как было установлено, что свет — это электромагнитные колебания, ученые знали, что свет обладает волновыми свойствами. Но что именно колеблется в световой волне, стало ясным только после того, как появилась теория Максвелла. Однако физикам удалось создать, по аналогии с волнами механическими и звуковыми, стройную теорию, которая позволила не только изучать волновые свойства света, но и измерить длину световой волны.

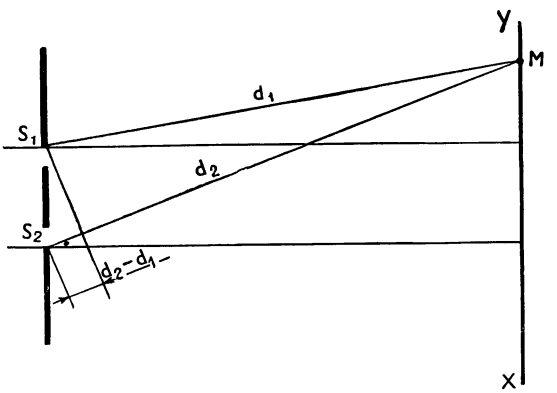



Рис. 22.

Волновое движение характеризуется длиной волны или частотой колебаний. Сложение волн называется интерференцией.

Осветим лампой накаливания экран $YX$ (рис. 22) через две очень узкие параллельные щели, которые расположены друг от друга на расстоянии 0,05 *мм*. На экране свет распределится равномерно. Освещенность экрана будет просто суммой освещенностей, даваемых каждой щелью в отдельности.

Если же через эти щели будет идти свет лазера (рис. 23), то на экране появятся светлые и темные полосы. Получится так называемая интерференционная картина — результат сложения гармонических колебаний. Освещенность в любой точке экрана уже не будет суммой освещенностей.

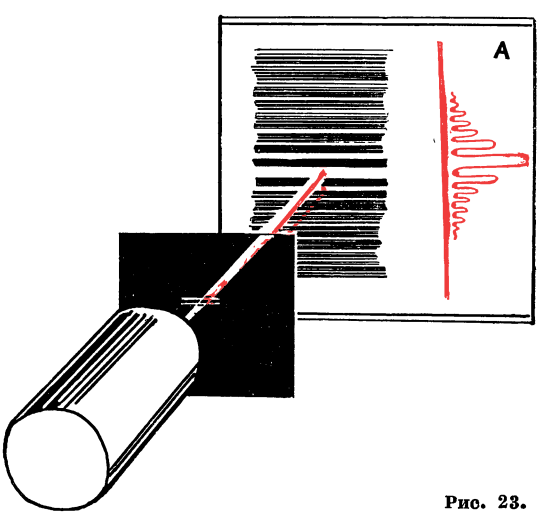



Рис. 23.

Понять это явление можно с помощью несложных математических расчетов (см. рис. 22). Всякое гармоническое колебание с длиной волны $\lambda$ и периодом колебания $T$, которое распространяется от щели $S_1$ к $M$, можно записать в виде формулы:

$$s_1 = a\cos\cdot 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda}\right).$$

Следовательно, световая волна, приходящая от щели $S_2$ в точку $M_1$, это:

$$s_2 = a\cos\cdot 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda}\right).$$

Складываясь в точке $M_1$, колебания $s_1$ и $s_2$ дадут результирующее колебание:

$$s = s_1 + s_2 = A\cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_2 + d_1}{2\lambda}\right)\right].$$

Амплитуда колебания $A$ будет равна

$$2\ a\ \cos\ \left(\pi\ \frac{d_2 - d_1}{\lambda}\right).$$

Освещенность пропорциональна квадрату амплитуды колебаний. В точке $M$ она равна

$$4a^2\cos^2\left(\pi\ \frac{d_2 - d_1}{\lambda}\right).$$

Наибольшие значения освещенности будут, когда

$$\cos\left(\pi\ \frac{d_2 - d_1}{\lambda}\right) = 1, \quad \text{т. е.} \quad \pi\ \frac{d_2 - d_1}{\lambda} = m\pi,$$

$$\text{или} \quad d_2 - d_1 = m\lambda; \quad m = 0,\ 1,\ 2\ldots$$

Определив положение, например, третьего максимума, когда $m = 2$, и вычислив величину $d_2 - d_1$, мы можем найти по этой формуле длину волны света, излучаемого лазером.

Почему же два даже очень малых накаленных тела не дают интерференционную картину? Это объясняется тем, что излучаемые такими телами электромагнитные волны никак нельзя представить в виде синусоидальной (гармонической) волны. Свет излучается атомами таких источников хаотически, или, как говорят, с переменной фазой, и интенсивности отдельных излучений просто складываются. Поэтому на экране и нет интерференционной картины. Квантовый же генератор дает колебания **гармонические** с постоянной разностью фаз. Такие колебания называются **когерентными**.

Но интерференция была изучена задолго до появления лазеров с помощью обычных источников света. Для этого французский физик Френель соорудил изящные оптические системы: зеркало и бипризму Френеля. В его опытах использовались два изображения одного и того же источника света.

Интерференционные методы исследования позволяют измерять длину волны с необычайной точностью. **Интерферометр** — специальный прибор, сконструированный на основании законов о сложении световых колебаний,— позволил определить длину волны оранжевой линии криптона-86 до восьмого знака, т. е. до одной десятимиллионной доли микрона. Длина эта равна 0,60578021 *мк*. Она принята в 1960 г. на международной XI Генеральной конференции по мерам и весам за **эталон длины** (см. ст. «Всему миру одну меру»).

## СВЕТ ОГИБАЕТ ПРЕДМЕТЫ

В 1818 г. в Париже на одном из заседаний французской Академии наук рассматривался мемуар (так назывались доклады ученых, представляемые в академию) Френеля. В докладе Френеля была изложена теория, которая объясняла прямолинейное распространение света, исходя из предположения, что свет — это волны. Известный ученый Пуассон, присутствовавший на заседании, сразу же указал на ошибочность рассуждений Френеля. Ведь из них следовало, что если перед очень небольшим источником света поставить непрозрачный экран с весьма ровными краями, то в центре тени от экрана, в точке $Б$, появится светлое пятно. Это, по мнению Пуассона, противоречило здравому смыслу. Тотчас же перед членами Академии был поставлен опыт (рис. 24). К удивлению ученых, в центре теневого круга появилось светлое пятнышко.

Проследим за рассуждениями Френеля (см. рис. 25). В точке $A$, центре сферы, находится точечный источник света. Световые волны от него дойдут одновременно до каждой точки поверхности сферы $S$. Действие источника $A$ можно заменить действием воображаемых источников света, на-

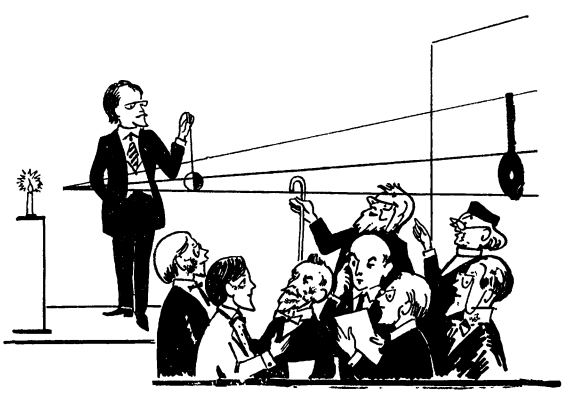


Рис. 24.

ходящихся на поверхности сферы $S$, от которых в точку $B$ распространяются световые волны. В точке $B$ эти волны складываются по законам интерференции волн.

Френель значительно упростил вычисления, разбив поверхность $S$ на кольцевые зоны так, что расстояния от внутренней и внешней

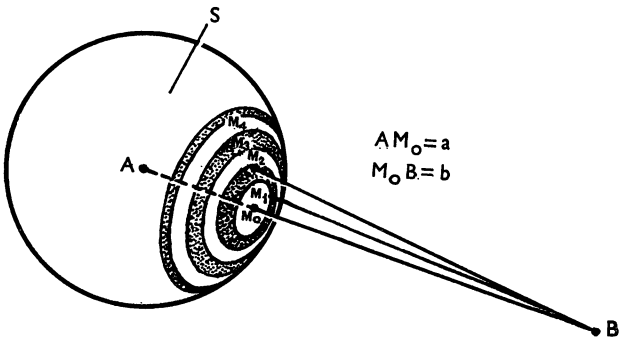



Рис. 25.

границ в каждой зоне до точки $B$ отличались на половину длины световой волны, т. е.

$$M_1B - M_0B = M_2B - M_1B = \ldots = \frac{\lambda}{2}.$$

При таком разделении у всех зон будет одинаковая площадь, равная $\pi \frac{ab}{a+b}\lambda$. Световые колебания, идущие от двух соседних зон, отстают друг от друга на половину длины волны. Если колебания гармонические и выходят от сферы $S$ в одинаковой фазе, то волны второй и третьей зон ослабляют друг друга в точке $B$.

Для удобства доказательства мы допустили, что свет идет со сферы $S$ в точку $B$. Чем дальше зона на сфере $S$ от точки $B$, тем меньше световая волна. Значение $S_0$ больше, чем $S_1$; $S_1$ больше, чем $S_2$, и т. д. Складываясь в точке $B$, колебания зон дадут суммарную амплитуду колебаний:

$$S = S_0 - S_1 + S_2 - S_3 + \ldots + S_n = \\ = S_0 - (S_1 - S_2) - (S_3 - S_4)\ldots$$

Величины $(S_1 - S_2)$, $(S_3 - S_4)\ldots$ малы и быстро убывают по мере того, как возрастает номер зоны. Действие световой волны источника $A$ в точке $B$ сводится практически к действию центральной зоны.

Длина волны зеленого света 0,5 *мк*. Если $a = b = 20$ *см*, то площадь действующей части волны равна:

$$\frac{\pi ab\lambda}{a+b} = 0{,}16\ мм^2.$$

Следовательно, свет от $A$ к $B$ распространяется вдоль узкого канала с осью $AB$. Иными словами, луч света распространяется прямолинейно.

Как же объяснить опыт, показанный Френелем на заседании Академии наук? Казалось бы, непрозрачный экран должен был закрыть центральную зону, и свет от источника $A$ не может попасть в точку $B$. Так предполагал и Пуассон. На самом же деле освещенность в точке $B$ создается и за экраном первой открытой зоной. Если экран невелик, действие этой зоны не отличается от действия центральной зоны. Освещенность за экраном в точке $B$ останется такой же, как если бы его и не было. Огибание светом непрозрачных тел, встречающихся на его пути, называется **дифракцией**.

## ЗВЕЗДА-ГИГАНТ

Одна из самых крупных звезд в созвездии Ориона — Бетельгейзе. Ее диаметр — 390 млн. *км*, т. е. больше, чем диаметр орбиты, по которой Земля движется вокруг Солнца. Солнце по сравнению с этой звездой — карлик: его диаметр в 278 раз меньше, чем диаметр Бетельгейзе. Но долгое время астрономы знали только, что Бетельгейзе — звезда первой величины. Измерить ее они не могли, так как никакие телескопы не позволяли определить угол, под которым видна эта звезда с Земли. (Угол этот называется угловым диаметром звезды.)

Измерить диаметр Бетельгейзе удалось только в 1920 г. Американские ученые физик А. Майкельсон и астроном Ф. Пиз применили для этого **интерферометр** — прибор, принцип действия которого основан на законах интерференции световых волн.

Чтобы понять действие интерферометра, проследим, как распространяется параллельный пучок света, пройдя через узкую щель. Разобьем щель на ряд параллельных полосок равной площади. Фазы волн, проходящих через эти полоски, одинаковы, так как лучи параллельного пучка доходят до щели одновременно. Амплитуды волн также одинаковы, потому что площади полосок равны. Линза, установленная за щелью, сводит параллельные лучи в фокальной плоскости $MM$ в одну точку. В этой плоскости установлен экран (рис. 26).

Все лучи в точку $B_0$ приходят в одной фазе, когда $\varphi = 0$. Если угол $\varphi$ не равен нулю, то волны от разных участков щели придут в точку $B_\varphi$ с разными фазами и могут ослабить друг друга. Так, если угол $\varphi$ удовлетворяет условию $b \cdot \sin\varphi = \lambda$, то в точке $B_\varphi$ свет будет ослаблен. То же самое произойдет, когда $\sin\varphi$ равен $\frac{\lambda}{b}, \frac{2\lambda}{b}, \frac{3\lambda}{b}\ldots$

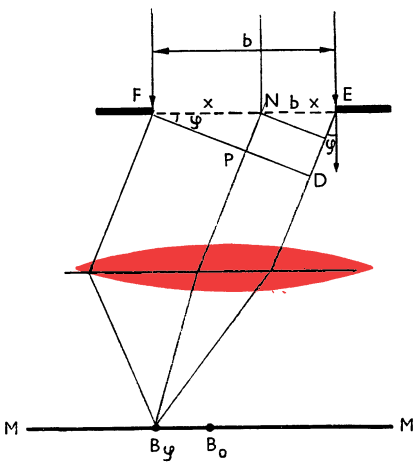



Рис. 26.

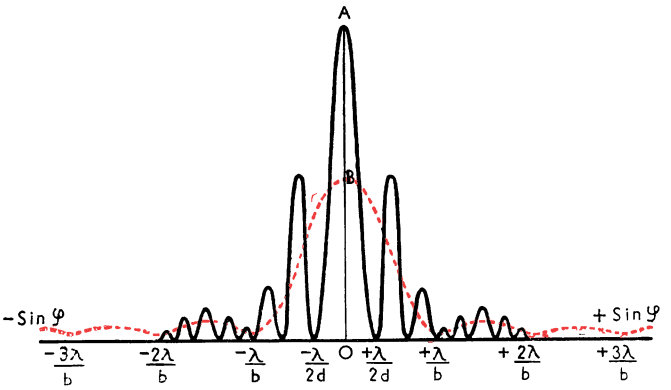



**Рис. 27. Распределение интенсивности света при дифракции на двух параллельных щелях шириной $b$, расположенных на расстоянии $d$ друг от друга. Пунктирная кривая — освещение щелей некогерентное, сплошная кривая — когерентное.**

В точках экрана, соответствующих этим углам, будут темные полосы. А между темными полосами лягут светлые полосы — **максимумы света.** Амплитуда волны достигает максимума в фокальной плоскости при углах

$$\varphi = 0; \quad \frac{b\pi}{\lambda} \sin\varphi = 1{,}43\pi; \quad \frac{b\pi}{\lambda} \sin\varphi = 2{,}46\pi.$$

Величина этих максимумов различна и быстро убывает с увеличением угла $\varphi$. Физики называют сочетание темных и светлых полос на экране, установленном в фокальной плоскости линзы, **дифракционной картиной.**

Поставим перед источником света экран с двумя щелями — $AB$ и $A_1B_1$. Если эти щели попеременно закрывать, дифракционная картина не будет меняться, потому что расположение максимумов определяется только направлением пучков света.

Если мы откроем одновременно обе щели, то в фокальной плоскости на экране дифракционные картины совместятся. Но это не будет простым наложением одной дифракционной картины на другую (рис. 27). В новой дифракционной картине скажется взаимодействие волн, идущих от обеих щелей.

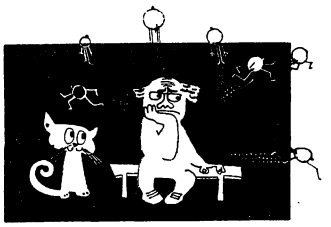
Принцип действия интерферометра заключается в измерении деталей дифракционной картины при падении света через две щели, расстояние $D$ между которыми можно изменять. Чтобы измерить, например, угловое расстояние между двумя близкими друг к другу звездами, перед объективом телескопа ставят экран с двумя щелями. Свет от одной звезды падает на щели параллельно главной оптической оси

## Почему ночью темно?

Этот простой вопрос далеко не так прост. Он волновал астрономов свыше ста лет. В бесконечной Вселенной звезд бесконечно много. Каждая звезда — солнце. Не имеет значения, что звезды далеки от нас. От бесконечного множества солнц свет должен слиться в ослепительном испепеляющем сиянии всего небесного свода. А между тем ночью темно! Почему? Попытка объяснить ночь тем, что свет от далеких звезд по дороге к нам поглощается межзвездной непрозрачной пылью, не оправдалась. Пыли в космосе немного, скопления ее редки и не могут заслонить от нас световые потоки, идущие из бесконечных глубин Вселенной.

Астрономы обнаружили удивительное явление. Его объяснения еще вызывают споры, но твердо доказано, что оно существует. Оказывается, чем дальше находится от нас звезда, тем быстрее она от нас удаляется и тем сильнее все линии в спектре ее излучения сдвинуты в сторону длинных волн. Этот замечательный эффект назван «красным смещением».

Открытие «красного смещения» прояснило загадку ночи. Свет далеких звезд смещается в невидимую глазом область спектра, и такие звезды перестают быть видимыми. Мало того, должен существовать такой предел во Вселенной, который пока ограничивает для нас возможность наблюдать звезды. Можно рассчитать, что с расстояний, превышающих 10 млрд. световых лет, свет до нас вообще дойти не может. На таком расстоянии «красное смещение» должно быть так велико, что частоты световых колебаний воспринимаемого нами излучения стремятся к нулю. Вот почему, оказывается, ночью темно.



телескопа, свет от другой звезды падает под углом $\theta$ к этой оси (рис. 28). Так как положение дифракционных картин в фокальной плоскости определяется только направлением падающего на щель света, то в данном случае дифракционные картины будут сдвинуты относительно друг друга на угол $\theta$. Центральная полоса $К_0$ и ближняя к ней полоса $К_1$ дифракционной картины, например, первой звезды сдвинуты друг от друга на угол $\varphi = \frac{\lambda}{D}$. Если расстояние между щелями изменять, то когда угол $\varphi$ будет равен $2\theta$, максимумы дифракционной картины первой звезды совпадут с максимумами от второй. Освещенность на экране в фокальной плоскости распределится почти равномерно. Угол $\varphi$ легко определить, проанализировав дифракционную картину от одной щели. Таким образом, дифракционные полосы «смываются» в тот момент, когда $\theta = \frac{\lambda}{D}$. Измерение угла $\theta$ сводится к определению величины $D$, когда пропадают дифракционные полосы.

Так же определяется и угловой диаметр одиночной звезды. Ведь края звезды можно рассматривать как два источника света, которые находятся на угловом расстоянии $\theta$.

Расстояние $R$ от звезды до Земли измеряется гораздо проще (см. в т. 2 ДЭ ст. «Как измеряют расстояния до небесных светил»). Умножив эту величину на угол $\theta$, выраженный в радианах, найдем линейный диаметр звезды — $R\theta$.

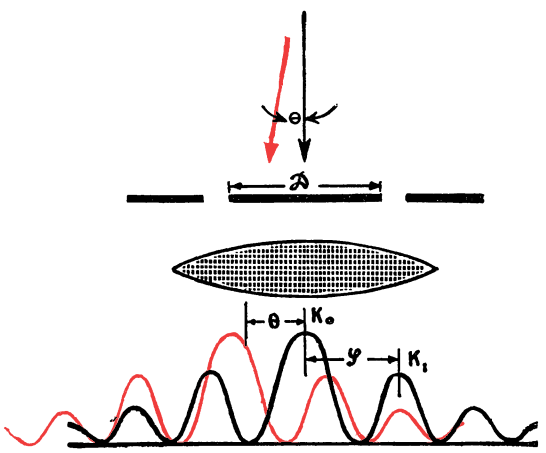



Рис. 28.

## ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Перед источником света могут быть не только две, но и большее количество щелей. Системa близко расположенных щелей называется **дифракционной решеткой** (рис. 29). Такая решетка может представлять собой стеклянную плоскую пластинку, на которую нанесено большое количество штрихов. Применяются, например, решетки, у которых на 1 *мм* приходится более тысячи штрихов.

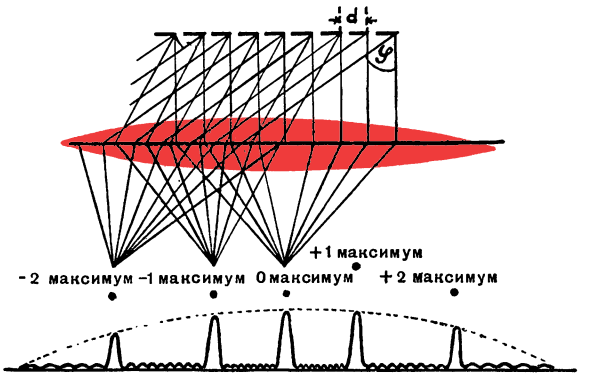



Рис. 29. Щели дифракционной решетки, $d$ — ее период.

Положение мест, где свет, рассеянный решеткой, собирается в светлые полосы — максимумы, определяется формулой $d \sin \varphi = m\lambda$ и зависит от длины волны. Чем меньше $d$, тем на больший угол $\varphi$ отклонятся друг от друга лучи с различной длиной волны. Если $m=0$, то угол $\varphi$ для любой длины волны равен 0. В этом направлении получится белая полоса. Когда $m=1$, на экране появится спектр первого порядка — цветные полосы.

Решетки с малым периодом $d$ позволяют измерить длину волны с точностью до шестого десятичного знака.

Первую дифракционную решетку построил Фраунгофер. Именно с ее помощью были открыты темные линии в спектре Солнца — **линии Фраунгофера**.

## ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

Быстро мчится автомобиль к перекрестку дорог. На светофоре горит красный сигнал, но машина, не останавливаясь, проскочила перекресток. Постовой задерживает водителя:

— В чем дело? Почему вы поехали на красный свет?

— Машина шла очень быстро... из-за этого красный свет показался мне зеленым.

Такой шуткой может, конечно, ответить только физик.

В самом деле, если двигаться навстречу

волне, то ее частота будет возрастать, а если удаляться, то убывать (рис. 6 на цвет. табл. у стр. 177). Это справедливо для всех волновых явлений, в том числе для света и звука (см. ст. «Звук»).

Когда наблюдатель движется по направлению к источнику света со скоростью $v$, частота световой волны $\nu$, которую он будет воспринимать, определяется формулой:

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}},$$

где $c$ — скорость света, а $\nu_0$ — частота световой волны, воспринимаемая наблюдателем, когда источник света неподвижен. С какой же скоростью должен был двигаться автомобиль, чтобы красный сигнал светофора показался водителю зеленым?

Длина волны зеленого света — 0,5 *мк*, а красного — 0,7 *мк*. Определив соответствующие частоты из зависимости $\nu = \frac{c}{\lambda}$, вычислим автомобиль должен был двигаться со скоростью 97 000 *км/сек*. Изменение длины волн при движении наблюдателя к источнику волны или от него называется **эффектом Доплера** (по имени открывшего это явление австрийского физика Х. Доплера). Эффект Доплера часто затрудняет спектральные измерения.

Современные приборы позволяют разделять спектральные линии, у которых длина волны света различается на 0,002 Å. Но в пламени горелки атомы движутся по самым разным направлениям, и скорость их движения около 1000 *м/сек*. Длина волны у атома, двигающегося к фокальной плоскости линзы $L_2$ в спектроскопе, будет на 0,03 Å короче, чем у атома, двигающегося в противоположном направлении.

Такая разница не давала исследователям возможность определить подлинную структуру спектральных линий. Вот, например, желтая спектральная линия натрия. Однородна ли она или состоит из нескольких линий? Из-за эффекта Доплера линии расширяются и за счет этого сливаются. Исследования А. Н. Теренина и Л. Н. Добрецова подтвердили такое предположение. Они установили коллиматор спектроскопа перпендикулярно светящемуся пучку атомов натрия. Ведь изменение частоты излучения атомного пучка пропорционально составляющей скорости атома, направленной на наблюдателя или от него. Когда же наблюдатель видит пучок сбоку, эта составляющая равна нулю.

Опыты Теренина и Добрецова установили, что обе линии натрия $D_1$ (0,5896 *мк*) и $D_2$ (0,5890 *мк*) оказались двойными. Так была открыта сверхтонкая структура спектральных линий. Уже после этого открытия было определено, что такая сверхтонкая структура вызвана взаимодействием электронной оболочки атома и его ядра.

## ВЕСТИ ИЗ МЕЖЗВЕЗДНОГО ПРОСТРАНСТВА

Вернемся к простейшему атому — к атому водорода. Когда электрон движется по ближайшей к ядру орбите, атом водорода находится в его основном состоянии — у него минимальный запас энергии. Но у ядра и электрона, кроме взаимодействия, происходящего за счет их зарядов, существует еще взаимодействие, обусловленное, в конечном счете, их собственным вращением (рис. 30). Когда и электрон и ядро вращаются каждый вокруг своей оси, в одинаковом направлении (например, по часовой стрелке), связь их между собой больше, чем если они вращаются в разные стороны. Это значит, что при «согласном» вращении запас энергии в атоме меньше, чем при вращении в «несогласном» направлении. Если электрон и ядро вращаются в «несогласном» направлении, то у атома есть запас энергии, который он может израсходовать и перейти в состояние, когда ядро и электрон будут вращаться в одном направлении. Такой переход может произойти ли-

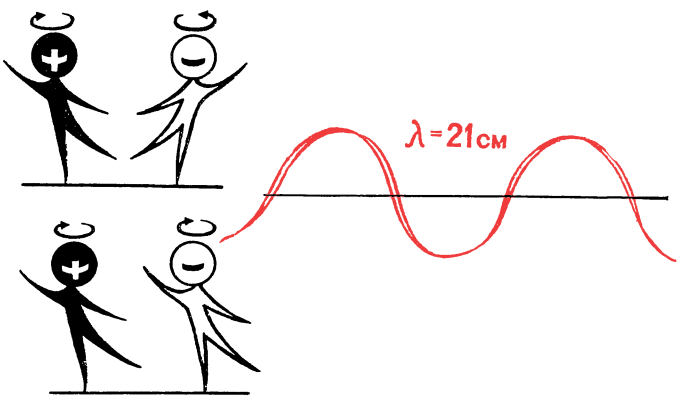



**Рис. 30. При переходе из одного состояния (вращение протона и электрона в разные стороны) в другое состояние (вращение протона и электрона в одну и ту же сторону) атом водорода испускает квант энергии, которому соответствует излучение с длиной волны в 21 *см*.**

бо при столкновении атомов, когда избыток энергии будет передан другому атому, либо атом водорода сам испустит квант электромагнитного излучения с длиной волны в 21 *см*.

В земных условиях атом газа сталкивается со своими «соседями» или стенками сосуда, в котором он заключен, от миллиардов до сотен миллиардов раз в секунду, а на то, чтобы атом водорода отдал свою энергию, испустив самопроизвольно квант — 21 *см*, в среднем требуется 11 миллионов лет! Поэтому в земных условиях атом не успевает отдать энергию в виде излучения с длиной волны в 21 *см*. Эта энергия перейдет в другие формы в результате столкновения.

Другое дело — межзвездное пространство. Здесь атомы на больших расстояниях друг от друга и сталкиваются редко: в среднем между двумя столкновениями проходит 300 лет.

В 1944 г. голландский студент-физик Ван де Хулст сделал доклад в Лейденском университете. В этом докладе он утверждал, что атом водорода должен излучать в межзвездном пространстве радиоволну длиной в 21 *см*. В то время Голландия находилась под фашистской оккупацией. Научные связи между учеными разных стран были прерваны. Лишь в 1947 г. идея Ван де Хулста стала известна широким кругам ученых.

Советский астрофизик И. С. Шкловский провел интересные и важные вычисления. Оказалось, что обнаружить излучение межзвездного водорода вполне разрешимая задача. Исследования этого излучения дают сведения о движении межзвездной материи и о структуре межзвездного пространства. Регистрируя излучение линии 21 *см*, удалось изучить структуру и движение Галактики. Исследования эти продолжаются.

## КВАНТЫ И ЭЛЕКТРОНЫ

Объясняя, как излучают нагретые твердые предметы, Планку пришлось ввести в науку понятие о квантах света — **фотонах**.

Чтобы понять, как действуют фотоны на вещество, поставим опыт (рис. 31). В вакууме помещены две металлические пластины. Соединим их извне проводом с включенным в него гальванометром. На одну из пластин направим свет. В гальванометре появится ток. Его создадут электроны за счет энергии, полученной ими от фотонов. Если в цепь включить батарею *Б* так, чтобы освещенная пластина была положительным электродом, промежуток между

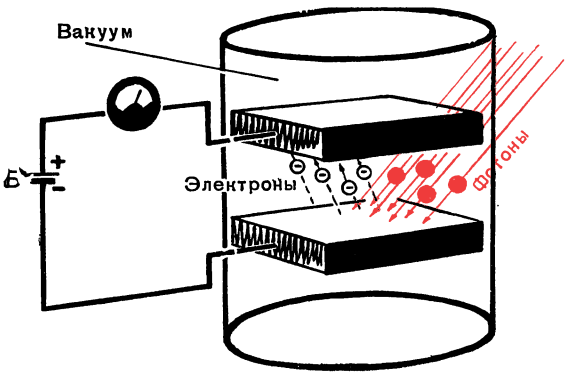



**Рис. 31. Фотоэффект.**

электродами станет проводящим. Фотоны выбивают из положительно заряженной и освещенной пластины отрицательные заряды. С увеличением напряжения между пластинами ток начнет падать и при некотором напряжении станет равным нулю. Это происходит потому, что не у всех отрицательных зарядов, выбитых фотонами из пластины, достаточно энергии, чтобы преодолеть притяжение положительного электрода.

Когда напряжение на положительном электроде достигнет такой величины, что даже самый «быстрый» электрон, выбитый из него фотоном, не дойдет до отрицательного электрода, ток в цепи гальванометра прекратится.

Способность фотонов выбивать электроны из твердых тел называется **фотоэффектом**. Его нельзя объяснить, если рассматривать свет как волну. Энергия света переходит в этом процессе в механическую энергию электронов, и свет здесь проявляет свойства частиц, как говорят физики,— **корпускулярные свойства**. Фотон ведет себя как частица с энергией $h\nu$ и количеством движения $\frac{h\nu}{c}$ (количеством движения любой частицы называют произведение ее массы на скорость).

В результате открытия фотоэффекта было выяснено, что свет одновременно обладает свойствами и волны и частицы. Такое сочетание свойств объясняет современная квантовая теория света.

В нашем опыте электроны покидали пластину и вылетали в вакуум, создавая электрический ток. Такой процесс называется **внешним фотоэффектом**. Многие полупроводниковые материалы в лучах света уменьшают свое электрическое сопротивление потому, что в кристаллической решетке полупроводника под действием фотонов возникают «свободные» электрические заряды.

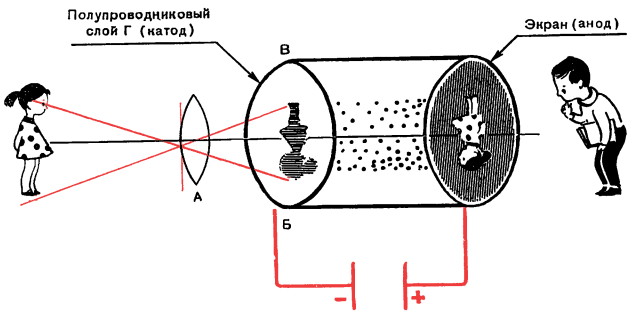



**Рис. 32. Электронно-оптический преобразователь.**

Такое действие света называют **внутренним фотоэффектом.**

В московском метро нельзя пройти через турникет, не опустив в его стойку пятикопеечную монету: не пропустит световой луч. Он пересекает проход и попадает на **фотоэлемент** (см. ст. «Полупроводники»). Если закрыть луч, фотоэлемент подаст сигнал. Радиолампы усилят этот сигнал и передадут его на механическую систему, закрывающую турникет.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом устроен так. На стенку стеклянного баллона нанесен металлический слой, а поверх него — слой полупроводникового вещества, это — катод. К катоду подведен отрицательный полюс батареи, а к аноду (никелевому стержню внутри баллона) — положительный. Когда свет выбивает из катода электроны, в цепи фотоэлемента течет ток. Когда света нет, нет и тока. Действие фотоэлемента можно усилить и использовать для управления любой механической системой.

В такую же схему, как и фотоэлементы с внешним фотоэффектом, могут быть включены и фотоэлементы с внутренним фотоэффектом. Они называются **фотосопротивлениями** потому, что увеличивают или уменьшают сопротивление электрической цепи, в которую включены. Самое ценное свойство фотосопротивлений — их способность реагировать на излучение слабо нагретых тел: на лучистую энергию с большой длиной волны, т. е. на инфракрасные лучи.

Ученые уже создали фотосопротивления, чувствительные к лучам с длиной волны около 9 *мк*. Вспомним закон Вина — закон смещения. $\lambda T = 2897$ *мк*. Если $\lambda = 9{,}35$ *мк*, то $T = \frac{2897}{9{,}35} = 309°К$, или примерно 36°Ц. Такие лучи испускает наше тело. Если бы человеческий глаз реагировал на эти излучения, мы ночью видели бы лица людей светящимися.

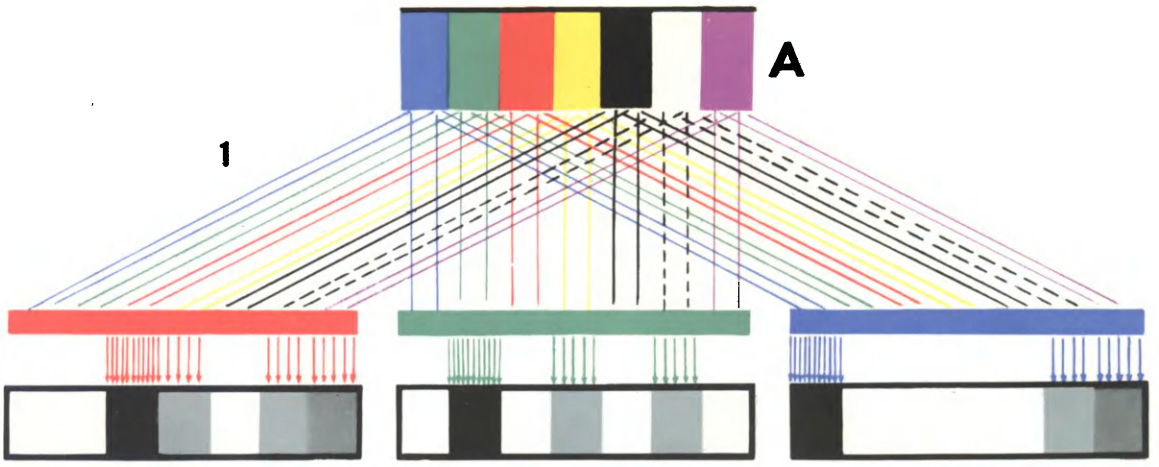
## НЕВИДИМОЕ СТАНОВИТСЯ ВИДИМЫМ

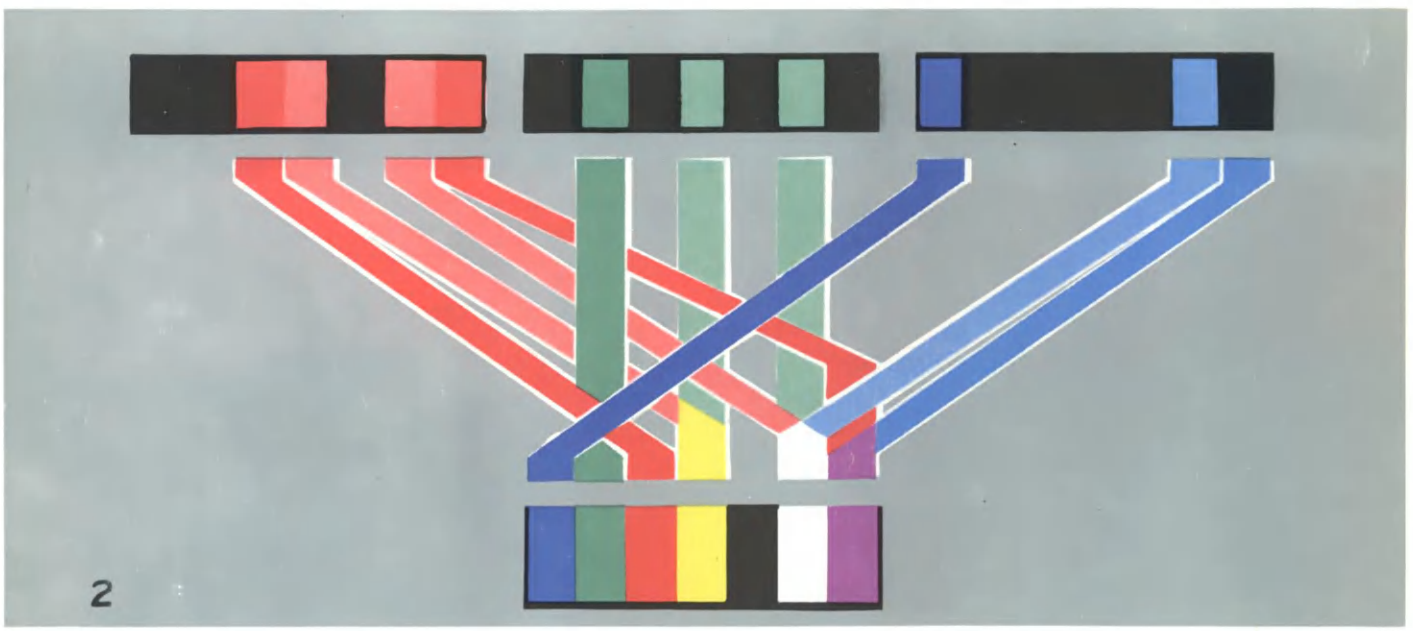
Инфракрасное излучение можно увидеть с помощью специального устройства — **электронно-оптического преобразователя** (рис. 32). Объектив *А* переносит изображение «светящегося» в темноте тела на экран *Б-В*, покрытый прозрачным полупроводниковым слоем *Г*. Падая на этот слой, кванты инфракрасного излучения выбивают из него электроны. Между слоем *Г* (катодом) и экраном (анодом) поддерживается электрическое напряжение; под его действием электроны двигаются, ускоряясь, к экрану и переносят на него инфракрасное изображение. Экран испускает уже видимое излучение.

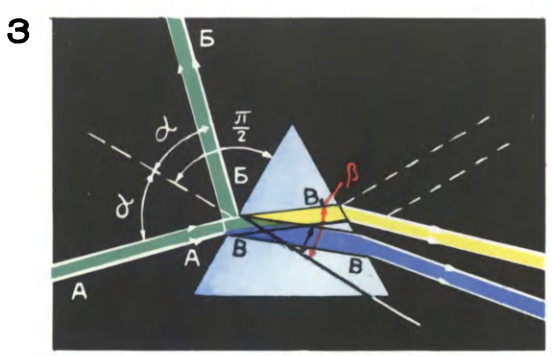
Можно и по-другому преобразовать инфракрасное изображение в видимое. Для этого на экран передающей телевизионной трубки наносится вместо слоя, реагирующего на видимый свет, полупроводниковый слой, чувствительный к инфракрасному излучению. Электронный луч передаст инфракрасное изображение с такого экрана через усилительную радиосхему на приемную трубку — кинескоп, такую же, как и в обычном телевизоре.

Обе эти системы позволяют преобразовать изображения очень слабо нагретых тел в видимые. Для электронно-оптического преобразователя фотоны должны обладать энергией, достаточной, чтобы выбить электрон из его чувствительного слоя. В телевизионном преобразователе, там, куда попадет излучение, должно измениться сопротивление слоя. Для этого энергия может быть меньшей, и, следовательно, можно обнаруживать излучения с более длинной волной.

**Изображение человека на экране кинескопа, полученное в полной темноте с помощью инфракрасной передающей трубки.**



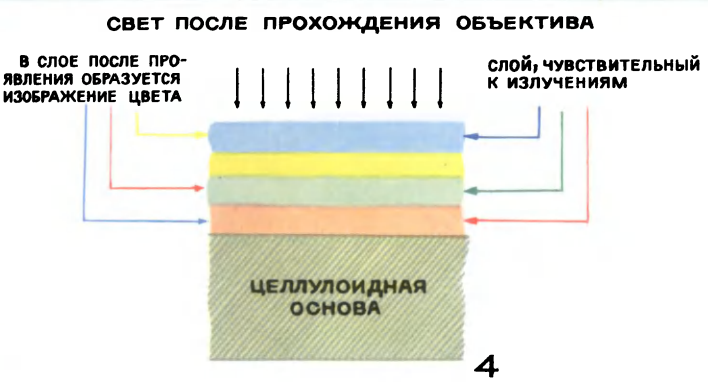
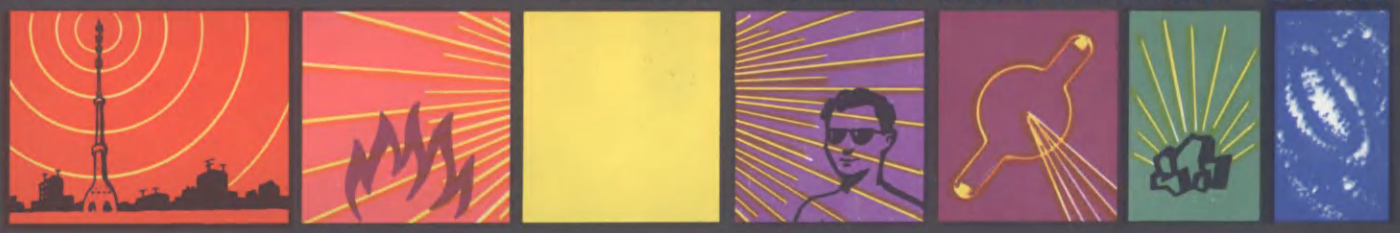




*Таблица к статье „Свет“*

**Цветная фотография.** *1.* Сфотографировать предмет *А* через красный, зеленый и синий светофильтры все равно, что сфотографировать его освещенным красными, зелеными и синими лучами. Негативы будут черно-белыми, но почернение эмульсии будет соответствовать разложению цветов светофильтром. *2.* Получение позитива с трех негативов. *3.* Ход цветных лучей в призме. *4.* Разрез трехслойной цветной фотографической пленки.

# СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

ДЛИНА ВОЛНЫ



30 000 м — 0,3 мм — 0,75 м — 0,4 м — 10 м/м — 0,1 мм — 0,001 мм

РАДИОВОЛНЫ | ИНФРАКРАСНЫЕ ЛУЧИ | ЛУЧИ ВИДИМОГО СВЕТА | УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ЛУЧИ | РЕНТГЕНОВСКИЕ ЛУЧИ | ГАММА-ЛУЧИ | ФОТОНЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

# СПЕКТР РАДИОВОЛН

ЧАСТОТА

10 кгц — 100 кгц — 150 кгц — 400 кгц — 500 кгц — 1500 кгц — 1,65 мггц — 3,75 мггц — 6 мггц — 30 мггц — 50 мггц — 60 мггц — 300 мггц — 3000 мггц — 30 ггц — 100 ггц

ДЛИННЫЕ | СРЕДНИЕ | ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ | КОРОТКИЕ | УЛЬТРАКОРОТКИЕ

МЕТРОВЫЕ | ДЕЦИМЕТРОВЫЕ | САНТИМЕТРОВЫЕ

РАДИОВЕЩАНИЕ

ДЛИННЫЕ | СРЕДНИЕ | КОРОТКИЕ | УЛЬТРАКОРОТКИЕ

ТЕЛЕВИДЕНИЕ

РАДИОТЕЛЕГРАФ | РАДИОТЕЛЕГРАФ | РАДИОНАВИГАЦИЯ, РАДИОЛОКАЦИЯ, РАДИОГЕОДЕЗИЯ и т.д.

## ГЛАВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР

Каковы бы ни были оптические устройства, все они рассчитаны на глаз человека. Это тоже оптический прибор (рис. 33). Его оптическую систему можно сравнить с оптической системой фотоаппарата. С помощью простейшего объектива (двояковыпуклой одиночной линзы) предмет, светящийся или отражающий лучи других источников света, может быть изображен в любой плоскости.

Объектив фотоаппарата передает изображение на фотопластинку, а оптика глаза — на **глазную сетчатку,** своего рода светочувствительный слой, передающий изображение в мозг. Объектив фотоаппарата, как правило, подвижен, так как изображения предметов, находящихся на разном расстоянии от аппарата, можно перенести на фотопластинку, только перемещая объектив вдоль его оптической оси. Глазная линза — **хрусталик** — изменяет с помощью особых мышц кривизну своей поверхности. Это дает возможность хрусталику, оставаясь неподвижным относительно сетчатки, изображать на ней по-разному удаленные от глаза предметы.

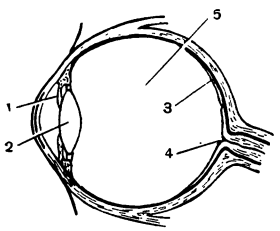



**Рис. 33. Глаз человека:** *1* — **радужная оболочка,** *2* — **хрусталик,** *3* — **сетчатая оболочка,** *4*—**слепое пятно и глазной нерв,** *5* — **стекловидное тело (студенистое прозрачное вещество).**

Диафрагма в фотоаппарате ограничивает пучок света, входящий в объектив.

Ту же роль играет в глазе **радужная оболочка.** В зависимости от силы светового потока, падающего на поверхность глаза, отверстие в радужной оболочке меняется помимо нашей воли.

Переведите взгляд с темного на яркий предмет: **зрачки** глаза начнут сужаться (уменьшается диаметр радужной оболочки), в глаз попадет уже меньшая доля светового потока. Так глаз защищается от излишней световой энергии.

Светочувствительный слой сетчатки состоит из элементов двух видов: **колбочек и палочек.**

*Таблица к статье «Радио»*

***Наверху*** **— спектр электромагнитных волн,** ***внизу*** **— спектр радиоволн.**

**Рис. 34.**

От каждой из них идет нервное волокно, передающее световое раздражение в мозг. В сетчатке человеческого глаза 120 млн. палочек и 6 млн. колбочек! Но есть место на сетчатке, не чувствительное к свету, — **слепое пятно.** Через него входит в глаз **зрительный нерв,** в котором собраны нервные волокна от всех палочек и колбочек.

Закройте правый глаз и посмотрите левым на крест, изображенный на рисунке 34. Боковым зрением вы увидите черный кружок слева. Если приближать рисунок к глазу, то на расстоянии 20—25 *см* круг исчезнет из поля зрения, — его изображение в глазу попадет на слепое пятно.

В области видимого света от 0,39 до 0,75 *мк* чувствительность человеческого глаза очень высока. Если человек долгое время находится в темноте, его глаза приспосабливаются к восприятию чрезвычайно малых световых потоков. Академик С. И. Вавилов доказал своими опытами, что глаз в таких условиях может чувствовать даже отдельные кванты света.

Не ослепляют глаз и большие потоки света. Они могут превосходить наименьшие потоки, воспринимаемые человеческим глазом, в 1000 млрд. раз (в $10^{12}$ раз). Такое соотношение было бы, например, если на одних и тех же весах взвешивать тела от 0,0001 *г* до 10 *т*: бациллу и железнодорожный вагон!

Глаз хорошо различает цвета, хотя он и по-разному реагирует на потоки монохроматического света одинаковой мощности, но с разной длиной волны.

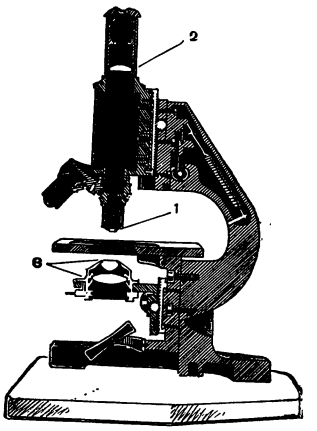
Желто-зеленые лучи покажутся самыми яркими, красные и фиолетовые—самыми слабыми. Если яркость желто-зеленого света ($\lambda$=0,555 *мк*), ощущаемую глазом, принять за единицу, то яркость голубого света ($\lambda$=0,49 *мк*) при той же мощности будет за две десятых, а яркость красного ($\lambda$=0,65 *мк*) — за одну десятую единицы (рис. 5 на цвет. табл. у стр. 177). Излучения с длиной волны меньше 0,3 *мк* (ультрафиолетовые лучи) и с длиной волны больше 0,9 *мк* (инфракрасное излучение) глаз даже в мощных потоках не почувствует. Если в диаграмме по оси абсцисс отложить чувствительность глаза к свету с различными длинами волны, а по оси ординат — соответствующую длину волн, то получим кривую спектральной чув-

ствительности глаза. Эту кривую называют **«кривой видности».**

Максимум чувствительности глаза совпадает с максимумом излучательной способности Солнца. Глаз приспособлен именно к солнечному свету. Но механизм зрения слишком сложен, и пока что нет полностью удовлетворительного объяснения, почему желтые и зеленые лучи кажутся глазу намного ярче, чем красные и фиолетовые.

Существует, быть может, и не очень серьезная, но все же интересная теория. В спектре лучей, которые пропускает в свои толщи вода морей и океанов, энергия распределена так же, как и на кривой, отражающей способность человека видеть цвета. Подводный мир освещен как раз тем светом, к которому человеческий глаз наиболее чувствителен.

Жизнь зародилась в океане. Глаза первобытных животных приспособились к свету морских глубин. Если предположить, что глаз в течение миллионов лет сохранил свои характеристики неизменными, пока живые организмы прошли путь от земноводных до человека, тогда все в порядке: это объясняет кривую видности человеческого глаза.

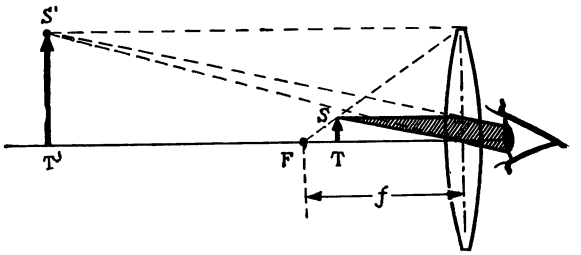



**Микроскоп в разрезе: *1* — объектив, *2* — окулярная линза, *3* — система линз осветителя (конденсатора).**

## ОПТИЧЕСКОЕ ВООРУЖЕНИЕ ГЛАЗА

Положите двухкопеечную монету на закопченное стекло, отставьте это стекло на 20 *см* от глаза и посмотрите сквозь него на Солнце. Двигая по стеклу монету, вы закроете ею Солнце. Гигантское Солнце удалено от нас на 150 млн. *км*, но его изображение на сетчатке глаза в десять раз меньше, чем изображение двухкопеечной монеты, отстоящей от глаза на 20 *см*. Это объясняется тем, что Солнце мы видим под углом зрения 31′, а монету под углом примерно в десять раз большим —5°. Лучи, идущие от контуров какого-либо предмета к зрачку, образуют угол, под которым мы видим предмет. Им и определяется видимая в глазе величина этого предмета. Если глаз видит две точки под углом, меньшим чем 1′, то они сливаются. Оптики определяют это свойство глаза так: **разрешающая способность глаза не превышает одну угловую минуту.** Хрусталик глаза не может изобразить предмет на сетчатке, если этот предмет отстоит от глаза меньше чем на 10 *см*. Максимально возможная кривизна хрусталика недостаточна для этого.

Чтобы видеть очень малые предметы под большим углом зрения, изобретен микроскоп.




**Самый простой микроскоп—двояковыпуклая линза. Когда предмет *TS* находится между линзой и ее фокусом *F*, линза дает мнимое увеличенное изображение *T′S′* на большем расстоянии от глаза, чем предмет *TS*. Если *T* находится намного ближе к *F*, чем к линзе, то угол, под которым виден предмет, примерно равен $\frac{TS}{f}$. Максимальный угол, под которым можно увидеть предмет, не применяя линзу, равен $\frac{TS}{d}$, где $d$ — наименьшее расстояние, на котором предмет отчетливо различается глазом. Отношение $\frac{d}{f}$ и есть угловое увеличение линзы; у одиночной линзы оно не превышает 20.**

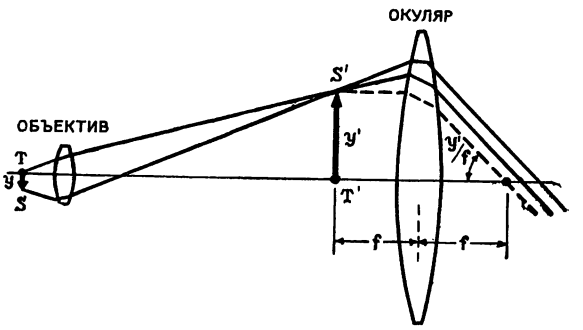



**Схема оптической системы микроскопа. Объектив — сложная линза с очень малым фокусным расстоянием — создает увеличенное изображение предмета. Это изображение рассматривается глазом через окуляр микроскопа.**

Современные биологические микроскопы увеличивают предметы от 400 до 2000 раз. Больше чем в 2000 раз никакой оптический микроскоп увеличить не может, потому что размеры предметов, рассматриваемых в микроскоп, должны быть сравнимы с длиной волны того света, которым освещен объект (рассматриваемый предмет). Иначе говоря, размеры деталей предмета, различимые в оптический микроскоп, определяются формулой:

$$d = \frac{0{,}61\lambda}{A}.$$

В этой формуле $A$ приблизительно равно единице. Для зеленого света величина $d$ равна 0,3 *мк*. Чтобы видеть предмет такого размера под углом зрения, большим чем 1′, достаточно увеличить его в 1000 раз. Если добиться большего увеличения, никаких новых подробностей в изображении не обнаружится. Попробуйте посмотреть через сильную лупу на фотографию, напечатанную в газете. Новых деталей вы не увидите, но изображение потеряет четкость. Излишнее увеличение не помогает. Так же и в микроскопе: слишком большое увеличение не поможет рассмотреть предмет, размеры которого меньше, чем световая волна. Такие предметы свет огибает по законам дифракции света.

А если освещать предмет ультрафиолетовым излучением? Ведь длина волны ультрафиолетовых лучей короче, чем у видимых лучей. Да, существуют такие микроскопы, но на этом много не выиграешь.

## ЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОСКОП

Изображения предметов можно получить не только с помощью световых лучей, но и применив пучки заряженных частиц, например электронов. Для этого и служит электронный микроскоп.

Допустим, нам нужно изучить вирусы, невидимые в самые лучшие оптические микроскопы. Каплю воды с вирусами наносят на очень тонкую коллодиевую пленку толщиной всего в 0,01 *мк*. Пленка высушивается и закладывается на так называемый **предметный столик** электронного микроскопа. На нее направляют параллельный пучок электронов (рис. 35). Тело вируса неоднородно, и разные его части рассеивают электроны по-разному. Чем сильнее рассеиваются электроны, проходящие через какую-либо часть вируса, тем меньшая доля

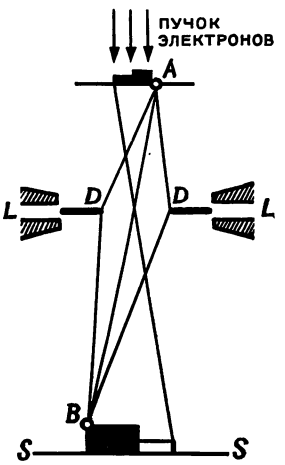
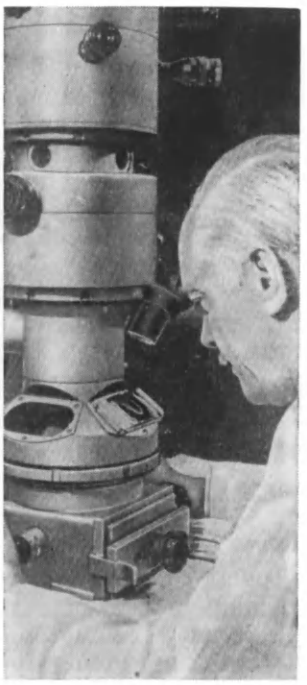



**Рис. 35. Оптическая схема электронного микроскопа.**



**Ученый-вирусолог смотрит в окуляр электронного микроскопа.**

их проходит через отверстие $DD$— апертурную диафрагму микроскопа. Электронная линза $L$ собирает в точке $B$ электроны, вышедшие из точки $A$ расходящимся пучком, и так точку за точкой дает электронное изображение предмета на светящемся под действием электронов экране $S$. Наименьшая плотность электронов, падающих на экран, будет в тех местах изображения, которые соответствуют наиболее плотным, а значит, и рассеивающим электроны частям вируса. Эти места на экране будут темными. Менее плотные и менее рассеивающие части вируса изобразятся как светлые участки.

На самом деле в электронном микроскопе нет экрана. Полученное в плоскости $SS$ изображение служит, как и в оптическом микроскопе, предметом для второй линзы, которая и дает изображение на экране, светящемся под действием электронов. На этом экране микроскопист рассматривает изображение в лупу.

Преимущество электронного микроскопа перед оптическим в том, что у него гораздо большая разрешающая способность.

Французский физик Луи де Бройль высказал смелую мысль: связь между длиной световой волны фотона и количеством его движения справедлива для любой частицы. Эксперименты подтвердили эту гипотезу. Если электрон движется со скоростью $v$, то длина его волны

равна $\lambda = \frac{h}{mv}$. В микроскопах электроны, падающие на рассматриваемый предмет, разгоняются электрическим напряжением порядка 15 000 *в*. Их скорость достигает 72 500 *км/сек*, а длина волны равна 0,1 Å. Так как длина волны электрона в 50 000 раз меньше световой волны в зеленой части спектра, то дифракция в электронном микроскопе сказывается значительно меньше, чем в оптическом. Разрешаемое расстояние $d$ ограничивается в них уже не дифракцией, а несовершенством электронных линз. В хороших электронных микроскопах $d$ достигает 6 Å, т. е. в 200 раз меньше, чем в ультрафиолетовом оптическом микроскопе.

## ТЕЛЕСКОП

У зрительных труб и телескопов другая задача: дать возможность под большим углом зрения рассматривать удаленные предметы. Телескоп с диаметром объектива или зеркала в $D$ *мм* позволяет различать предметы, угловые размеры которых равны $\frac{140''}{D}$. Из этой формулы следует, что разрешающая способность телескопа может быть увеличена, если в нем поставить зеркало большего диаметра. Существуют телескопы с диаметром зеркала около 5 *м*. (О телескопах подробнее рассказано в т. 2 в ст. «Как работают астрономы».)

## ЦВЕТНАЯ ФОТОГРАФИЯ

Глаз отличает в солнечном спектре семь цветов и множество оттенков. Цвета, например синий и желтый, нормальный глаз легко различит, даже если их яркость одинакова. Мы считаем одинаковыми цвета двух монохроматических пучков, если длина их волн отличается всего на 0,001 *мк*. Только когда разница в длине волны достигнет 0,002 *мк*, глаз начинает чувствовать различие в цвете.

Но глаз ни в коей мере не может быть таким же точным, как спектроскоп, не может заменить его. Световые потоки с совершенно различным спектральным составом могут восприниматься нами как потоки одинакового цвета. Больше того, смешав в определенной пропорции три основных цвета, можно получить любой спектральный цвет и даже цвет, которого нет в спектре: малиновый, пурпурный и, наконец, белый. На этом явлении основана цветная фотография.

В технике цветного фотографирования за основные цвета приняты синий, зеленый и красный. Еще в 1861 г. Максвелл указал на возможность получать многоцветное изображение из этих трех цветов (см. цвет. табл. у стр. 192). Сделаем с предмета, окрашенного в различные цвета, три обычных фотоснимка, освещая его красным, синим и зеленым светом. Изготовим три отпечатка на позитивных фотопленках, затем каждую из этих пленок окрасим в цвет того света, которым освещался предмет при получении ее негатива. С помощью трех проекционных фонарей совместим на экране все три цветных изображения: снятый предмет предстанет перед нами во всех его натуральных цветах. Из трех цветов получились все остальные.

Свет, падающий на фотопленку, разлагает в ее светочувствительном слое бромистое серебро. В проявителе те места пленки, куда попало много света, станут темными, а где света было мало — светлыми. Так получают негатив черно-белого изображения.

Фотографируя в красных лучах, мы тоже получим черно-белое изображение, но почернения образуются в тех местах снятого предмета, которые отражали цвета — оранжевый, желтый, пурпурный, ну, и, конечно, сам красный цвет. Места изображения, где предмет окрашен в зеленый, голубой, синий и черный цвета, останутся светлыми. Предмет был окрашен в красный цвет, и потому эти места его не отразили.

С негативной пленки получают позитив, и на нем соотношение черных и белых пятен будет обратное: красно-желтые оттенки дадут светлые пятна, а сине-зеленые — темные пятна.

Так же получают и две другие позитивные пленки. На негативе, снятом в зеленых лучах, почернение будет там, где предмет окрашен в цвета: голубой, зеленый, желтый, белый и серый. На негативе, полученном при синей подсветке, почернение получится там, где предмет окрашен в цвета: синий, голубой, пурпурный и белый.

На экране в результате смешения цветов изображение предмета будет окрашено в натуральные цвета. С помощью специальных приемов и проявителей можно таким же способом, с трех негативных пленок, зафиксировать цветное изображение и на фотобумаге, конечно, не на обычной, а на специально изготовленной для цветного фотографирования.

В 30-х годах нашего столетия изобретены способы, как получать цветную фотографию не с трех, а с одной негативной пленки, снимая

предметы, освещенные обычным солнечным светом. Фотографируют на специальную цветную пленку. В ее светочувствительной эмульсии три слоя, каждый из которых чувствителен только к одному цвету. По тому же принципу изготовляется и специальная цветная фотобумага.

## РОЛЬ ОПТИКИ В РАЗВИТИИ ФИЗИКИ

Многие поколения ученых, пытаясь определить, что такое свет, ставили исключительно тонко задуманные и в совершенстве исполненные опыты. На основании этих опытов создавались новые физические теории, которые касались не только оптики, но и всех разделов физики.

Более двух тысяч лет назад был установлен закон о прямолинейном распространении света. Следующий шаг сделал Ньютон: он доказал, что призма разлагает белый свет на «простые» цвета. Френель обосновал волновую теорию света. Максвелл доказал, что световая волна — это электромагнитные колебания. Ученые, исследуя излучения накаленных тел и линейчатые спектры паров и газов, создали квантовую теорию — основу всей современной теоретической физики.

В наше время энергия света играет большую роль и в технике, особенно в измерительных приборах. Во многих случаях никакими другими способами нельзя получить такие точные результаты измерений, как с помощью световых волн.

Еще совсем недавно многие физики считали, что в науке, изучающей свет,— в оптике — вряд ли можно ожидать революционные открытия: ведь этой науке более двух тысяч лет. Но это, конечно, не так. Еще многое в науке о свете осталось неясным и требует кропотливых и длительных исследований. Некоторые ученые считают, что «свет — самое темное место в физике»; пожалуй, они правы.

В 1960 г. оптика снова вторглась во все разделы физики. Созданы новые источники света — лазеры, яркость луча которых в сотни миллионов раз превосходят яркость Солнца. Уже теперь ученым ясно: в очень недалеком будущем лазеры окажут огромное влияние на развитие науки и техники.

Вечно молодая наука о свете опять оказалась на переднем крае науки.

■

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

## МАГНЕТИЗМ

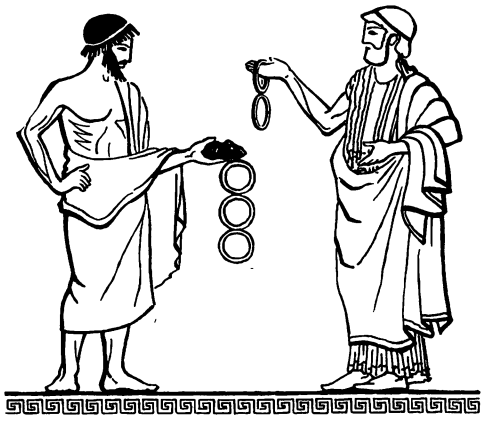
Нет, наверное, такого человека, который не слыхал бы или не читал детскую сказочку о Мальчике-с-пальчик. А каждый тот, кто помнит ее, знает, как Мальчик-с-пальчик ухитрился найти дорогу домой: он оставлял на дороге камушки. Но такое происходит не только в сказках. Например, некоторые виды муравьев отмечают себе обратную дорогу капельками сильно пахнущей жидкости.

Отправляясь в поход или в путешествие, прежде всего позаботься о компасе. Он надежнее, чем камушки мальчика из сказки. Магнитная стрелка определит направление стран света и не даст заблудиться в дороге.

В древние времена свойства магнитной стрелки казались волшебными. В древней Греции это свойство связывали с деятельностью богов. Камень, которым натирали железную иглу, называли камнем Геркулеса.

«Этот камень не только притягивает железное кольцо,— он одаряет своей силой и кольцо, так что оно в свою очередь может притягивать другое кольцо, и таким образом может висеть друг на друге множество колец или кусков железа; это происходит благодаря силе магнитного камня». Так древнегреческий мудрец Сократ описывал свойство камня, найденного вблизи города Магнесия, в Малой Азии.

Древние народы хорошо знали этот удивительный камень. В Китае и Индии о нем ходили легенды. Там же, на Востоке, впервые догадались, что намагниченной иглой можно пользоваться как указателем севера или юга. И по сей день к о м п а с — надежный помощник путешественника, штурмана, геолога, туриста.



Всем известно, что голуби, как и многие виды птиц, возвращаются домой за сотни километров. Еще древние египтяне заметили это и использовали голубей для связи. Во время франко-прусской войны 1870 — 1871 гг. голуби доставили в осажденный Париж 150 тыс. официальных депеш и почти миллион писем!

Но по каким же приметам ориентируются голуби? С Мальчиком-с-пальчик все понятно. С муравьями тоже. А голуби? Как они находят дорогу из Америки в Европу (были и такие случаи)?

Некоторые ученые-орнитологи предполагают, что голубям помогает особое чувство — магнитная ориентировка. Но это еще не доказано.

Магнетизм с незапамятных времен загадывает людям множество загадок, и, проникая в его секреты, ученые все больше убеждаются, что природа магнетизма неисчерпаема, а его закономерности влияют на многие жизненные процессы.

Если же мы охватим взглядом все, что связано и с магнетизмом и с электричеством, и попытаемся представить себе все значение электрических и магнитных явлений, то увидим, что ни наука, ни техника, ни многие другие проявления человеческой деятельности просто немыслимы без познания и использования их законов.

## Магнитная стрелка

Намагниченная игла — магнитная стрелка не всегда устанавливается послушно в направлении север — юг. Наблюдения за ее поведением показали, что она может «капризничать».

«Всякий раз, когда я плыву из Испании в Индию,— свидетельствовал Христофор Колумб,— я замечаю, отойдя 100 морских миль к западу от Азорских островов, необычайное изменение в движении небесных тел, температуре воздуха и поверхности моря. Я тщательно отмечал эти изменения и нашел, что компас, до того отклонявшийся к северо-востоку, теперь переходил к северо-западу...».

Угол, на который отклоняется стрелка от направления север — юг, называют склонением. Если на географической карте нанести склонения, получится так называемая геомагнитная карта склонений.

Склонение вызывается тем, что направление на географический полюс не совпадает с направлением на магнитный. Но нередко стрелка капризничает и по другой причине. Долгое время всех удивляло беспокойное поведение стрелки компаса вблизи Курска, это явление называли Курской магнитной аномалией. А потом выяснилось, что под Курском богатейшие залежи железной руды, кое-где выходящей даже на поверхность. Эта руда и вызывает беспокойство у магнитной стрелки.

Но, что самое интересное, вызывает она беспокойство и у птиц. Долетая до магнитных аномалий, они разбиваются на отдельные группы, строй их нарушается, и так продолжается до тех пор, пока они не выберутся из тревожного места.

По уклонению магнитной стрелки от меридиана люди обнаруживают железную руду. Так были найдены залежи не только под Курском, но и в Казахстане, и в ряде других мест.

Наблюдения за магнитной стрелкой помогли открыть еще одно ее свойство: она не только отклоняется от магнитного меридиана, но и наклоняется к земле. Это легко обнаружить, если подвесить длинную магнитную стрелку за центр ее тяжести. Еще нагляднее покажет это явление простой прибор: шарик из пробки надо проколоть намагниченной иглой и положить его на поверхность воды.

Наклонение стрелки или иглы дает возможность понять, какая причина заставляет ее поворачиваться в направлении север — юг. Было время, когда предполагали, что магнитные силы находятся на Северном полюсе, где сосредоточены магнитные горы, или на Полярной звезде. Но на севере гор нет, и конец стрелки тянется книзу, а не вверх.

В 1600 г. в Лондоне вышла книга королевского лейб-медика Вильяма Гильберта «О магните, магнитных телах и великом магните Земли». Гильберт полагал, что Земля подобна намагниченному шару. Сделав стальной шар, он намагнитил его так, чтобы в диаметрально про-

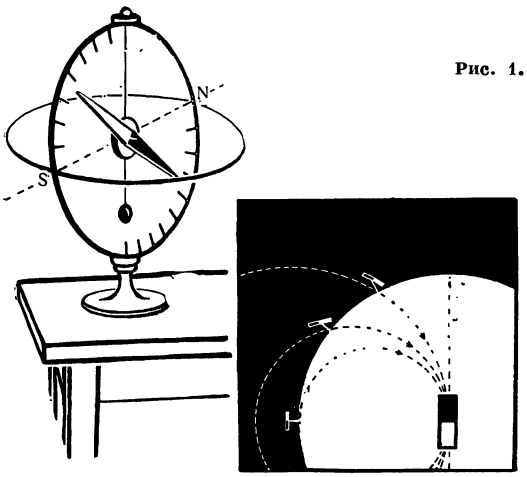



Рис. 1.

тивоположных точках были ярко выражены полюсы. Перемещая магнитную стрелку вдоль меридиана, Гильберт наблюдал, как наклонение ее концов убывает от одного полюса к другому, а на экваторе становится равным нулю. И Гильберт сделал вывод, что магнитные силы сосредоточены в самой Земле. В наше время магнитное поле Земли уже объясняется процессами, которые должны происходить в ее ядре. Земля — гигантский магнит. Магнитные стрелки устанавливаются вдоль незримых линий, которые идут над поверхностью Земли от одного магнитного полюса к другому, и в каждой точке стрелка направлена по касательной к такой линии (рис. 1).

Книга Гильберта была началом науки о магнетизме, который привлекает внимание ученых вплоть до наших дней. Гильберт заметил, что при намагничивании железный стержень удлиняется. В 1847 г. Д. Джоуль исследовал это явление и обосновал закономерности магнитострикции — попеременного удлинения и укорачивания металлического стержня при перемагничивании. Магнит, указывал Гильберт, теряет свои свойства при сильном нагревании (рис. 2). В 1895 г. Пьер Кюри установил зависимость магнитных свойств магнетиков от температуры, и в учении о магнетизме появилась точка Кюри. Если об этих свойствах известно не всем, то уж каждый знает, что, как ни разламывать магнит, в любом его куске будет все равно два полюса. Это свойство магнита побудило исследователей задуматься, что же происходит в железе при его намагничивании?

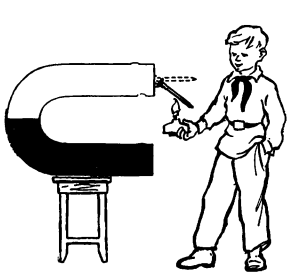


Рис. 2.

## Крутильные весы

Одноименные полюсы двух магнитных стрелок отталкиваются (рис. 3), противоположные притягиваются (рис. 4). Сила, с которой взаимодействуют полюсы магнита, была впервые определена с помощью крутильных весов. Весы эти изобрел Шарль Огюстен Кулон. Будучи са-

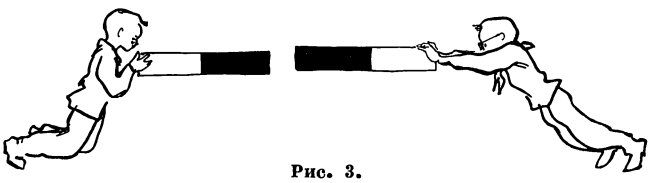


Рис. 3.

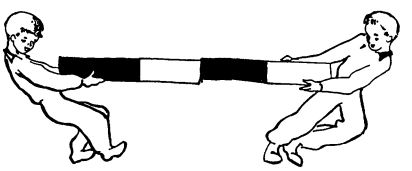


Рис. 4.

перным офицером французской армии, он все свободное время посвящал научным занятиям. В 1779 г. Кулон удостоился приза Академии наук за работу о судовом компасе, а через два года был избран членом Академии. В 1784 г. он сконструировал крутильные весы (рис. 5), чтобы исследовать упругие свойства проволоки, и вначале вовсе не помышлял о магнитах. Потом же оказалось, что если на проволоку подвесить продолговатый магнит и к одному из его концов поднести конец другого магнита, то из-за их взаимодействия проволока начнет закручиваться, и это будет продолжаться, пока сила притяжения или отталкивания не уравновесится упругой силой закрученной проволоки.

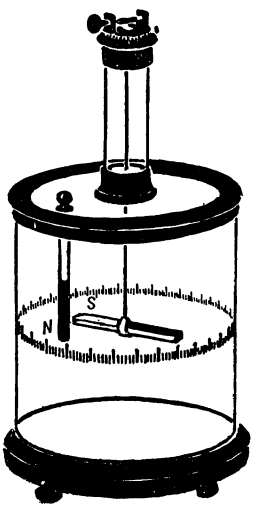



Рис. 5.

Верхний конец проволоки закреплялся после того, как магнит, подвешенный на ее нижнем конце, был установлен вдоль магнитного меридиана. Угол закручивания проволоки определялся световым зайчиком, отраженным от зеркальца, которое было прикреплено к нижнему концу проволоки. Весы были установлены в стеклянном цилиндре. Деления на его стенках позволяли измерять расстояние между полюсами взаимодействующих магнитов. Так как при взаимодействии подвешенный магнит уклоняется от магнитного меридиана, то величина силы взаимодействия отличается от истинной, ибо в нем участвует магнитная сила Земли. Магнитную силу Земли можно учесть, замеряя угол закручивания проволоки, при котором подвешенный к ней магнит сохраняет свое положение после того, как другой магнит убран.

В результате исследований стало возможным утверждать, что величина силы взаимного действия двух магнитных полюсов пропорциональна их **магнитным массам** и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2},$$

где $m_1$ и $m_2$ — магнитные массы полюсов магнитов, а $R$ — расстояние между ними.

Этот закон назван именем Кулона.

Но, изучая архивы английского ученого Генри Кавендиша, Максвелл обнаружил статью, из которой следовало, что тот еще раньше Кулона создал прибор, схожий с крутильными весами. Но Кавендиш не опубликовал свое открытие.

Закон Кулона внешне сходен с законом всемирного тяготения. Сила тяготения тел, как показал Ньютон, пропорциональна их массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Случайное ли это совпадение? Этот вопрос возник давно, однако исчерпывающего ответа на него пока нет.

Кулону принадлежат весьма убедительные доводы, почему магнитная сила Земли лишь поворачивает магнитную стрелку, но не смещает ее. Силы взаимодействия между каждым из полюсов Земли и стрелкой равны по величине, приложены к ее концам, параллельны, но направлены в противоположные стороны. Силы, приложенные к телу таким образом, не могут его смещать. Их действие приводит к вращению тела. По мере приближения стрелки к направлению меридиана линии действия этих сил $F_1$ и $F_2$ сближаются, уравновешивают друг друга, и стрелка устанавливается по магнитному меридиану (рис. 6).

Кулон полагал, что в железе при намагничивании образуются маленькие магнитики. В каждой частичке железа есть северный и южный магнетизм, и их можно отделить друг от друга. Заблуждение Кулона рассеял ирландский химик Ричард Кирван в 1797 г. Он предложил

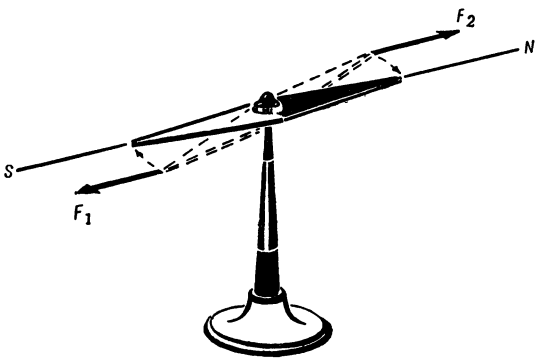



Рис. 6.

рассматривать молекулы железа как природные магниты независимо от того, намагничено оно или нет. Когда железный брусок натирают от середины к краям противоположными полюсами магнита, магнитики-молекулы, подобно стрелке компаса, устанавливаются вдоль бруска и сам он становится магнитом (рис. 7). Такое представление объясняло, почему магнитную силу нельзя увеличивать в железном бруске беспредельно. Предел наступает, когда все магнитики-молекулы повернутся в одну сторону.

Таким образом, к началу XIX в. природу магнетизма стали усматривать в свойствах, при-

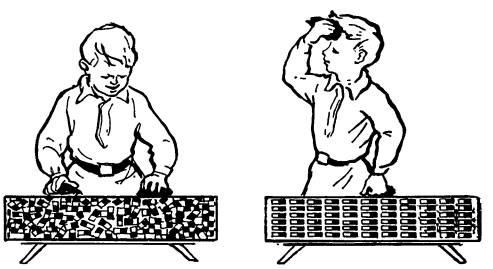


Рис. 7.

сущих молекулам: намагничивание — это магнитная ориентация молекул в одном направлении. Дальнейшие исследования магнетизма все теснее связывались с изучением электричества.

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Электродвижущую силу атмосферного электричества ученые исследуют и в наше время.

Проявление электричества в природе известно каждому. Это молнии — мгновенные разряды атмосферного электричества. Реже встречаются шаровые молнии — бесшумно парящие скопления электрических зарядов. Но электричество играет большую роль в самых разнообразных явлениях природы, которые на первый взгляд кажутся совсем не электрическими.

### Янтарь-электрон

В древние времена к берегам Балтийского и Северного морей металл привозили из средиземноморских стран. Среди товаров, получаемых в обмен, особенно ценилась ископаемая смола. На севере ее называли янтарем, а на юге — электроном. Из янтаря-электрона делали украшения.

Обрабатывая янтарь, греки заметили, что, если его натереть, он притягивает ворсинки шерсти, обрывки ниток, волосы, перья. В обиходе появились даже янтарные палочки, которыми собирали пыль с одежды.

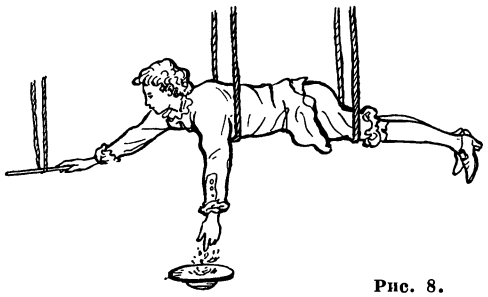


Рис. 8.

Удивительное свойство натертого янтаря не привлекало до Гильберта внимание ученых. Гильберт первым обнаружил, что этим свойством обладают очень многие вещества — алмаз, сера, кварц и, как потом обнаружилось, даже металлы. Электризацию металлов наблюдал в начале XVIII в. английский ученый Грей. Чтобы обеспечить изоляцию от земли, он натирал металлические предметы, расположившись на качелях, которые были сделаны из волосяных веревок (рис. 8).

Силу притяжения, которой обладает натертое тело, Гильберт назвал электрической, а связанные с этим явления — электрическими явлениями. Этим он подчеркнул роль янтаря-электрона в новой области науки.

Сначала электрическими явлениями лишь развлекались, но постепенно к ним стали относиться серьезно, ими заинтересовались ученые. В середине XVII в. магдебургский бургомистр Отто фон Герике, открывший немало физических явлений, сделал большой шар из серы, насадил на ось и, вращая, электризовал его трением (рис. 9). Шар легко притягивал пушинки.

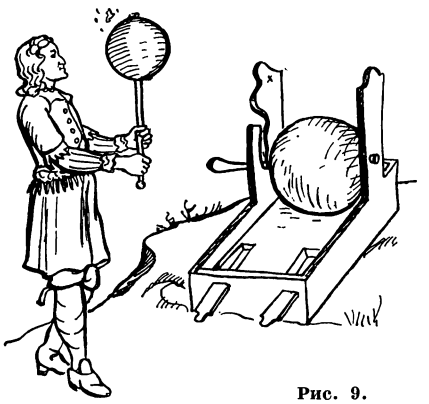


Рис. 9.

Коснувшись шара, пушинка отталкивалась от него. Так было открыто электрическое отталкивание. При электризации шара Герике слышал легкое потрескивание, а проводя опыт в темноте, обнаружил слабо мерцающие электрические искры. Но самые важные открытия начались в XVIII в. Лишь тогда ученые стали находить правильные объяснения свойствам янтаря и других наэлектризованных тел и пытаться применить эти свойства на практике.

### Два вида электричества

Французский естествоиспытатель Шарль Дюфе экспериментировал однажды с наэлектризованным золотым листком, удерживая его в воздухе тоже наэлектризованной стеклянной палочкой. Он приблизил к листку наэлектризованную палочку смолы: вопреки ожиданию, она не оттолкнула листок, а притянула. Дюфе продолжал опыты и, в конце концов, разгадал новое явление. «... Существует два рода электричества — один род я называю стеклян-

ным электричеством, а другой смоляным, — писал он.— Первый род получается (трением) в стекле, в драгоценных камнях, в волосах, в шерсти и т. д., другой — в янтаре, смоле, шелке и т. д. Существенное различие этих двух родов электричества состоит в том, что каждый из них отталкивает электричество того же рода, но притягивает электричество другого рода».

Какого рода электричество получилось после натирания предмета, помогает узнать электрический маятник — шарик из бузины, подвешенный на шелковой нити. Если к шарику приблизить стеклянную наэлектризованную палочку, он притянется к ней и, коснувшись, оттолкнется: шарик зарядился стеклянным электричеством! Если теперь поднести смоляную палочку, он притянется к ней, а потом оттолкнется. Шарик зарядился смоляным электричеством.

Бенджамин Франклин, рассуждая о причинах электризации тел при трении, полагал, что происходит перераспределение «электрического вещества», содержащегося в каждом теле. Избыток его не может находиться внутри тел и выступает на поверхность. Тело заряжено положительно, что соответствует «стеклянному электричеству». Недостаток электрического вещества соответствует отрицательно заряженному телу («смоляное электричество»). Названия двух родов электричества —

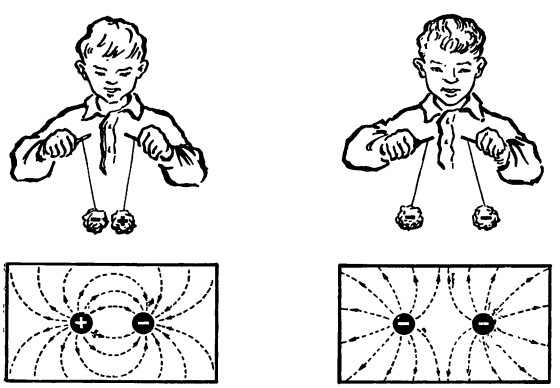


Рис. 10.

положительное (плюс) и отрицательное (минус) — стали общепризнанными (рис. 10), но гипотеза Франклина об одном лишь роде электричества оказалась неверной.

Количественные исследования электрической силы провел Кулон на тех же крутильных весах. На серебряной нити подвешивалась палочка из шелка. На одном ее конце был бузиновый шарик, на другом, для равновесия,— бумажный кружок, смоченный скипидаром. К шарику прикасались таким же заряженным шариком, оба получали одинаковый заряд и отталкивались. Шарик на весах закручивал серебряную нить на такой угол, при котором упругая сила кручения уравновешивала электрическую силу отталкивания (рис. 11).

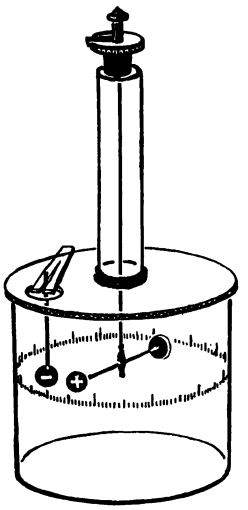


Рис. 11.

Измерив углы закручивания при различных зарядах и подсчитав силы отталкивания, Кулон обнаружил в 1785 г. закон взаимодействия электрических зарядов: сила взаимодействия пропорциональна величине зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Этот закон можно записать так:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{R^2},$$

где $q_1$ и $q_2$ — величина электрических зарядов, а $R$ — расстояние между ними. Измерения силы взаимного действия производились в воздухе.

Натирая и электризуя тела, исследователи долго не обращали внимание на то, что электризуются при этом оба тела, причем противоположными зарядами. Но как только это заметили, стало ясно: электризация тел — это не создание электрических зарядов, а их разделение.

Тела, наэлектризованные равными противоположными зарядами, соприкасаясь, теряют свойство притяжения. Заряды при этом не уничтожаются, а нейтрализуются, т. е. на каждом из тел становится поровну положительных и отрицательных зарядов.

Все это позволяет сделать очень важный вывод: каждое электрически нейтральное тело содержит равные количества положительных и отрицательных зарядов. Тело окажется наэлектризованным в том случае, если зарядов одного знака будет больше, чем зарядов другого.

## Электрический ток

В первых же опытах с электризацией тел обнаружилось, что одни из них хорошо передают электрический заряд, а другие совсем не

передают. Первоначально все вещества поделили на **проводники** и **изоляторы**. Потом выяснилось, что изоляторы можно в свою очередь поделить на плохие проводники и **полупроводники**. Оказалось, что плохой проводник, например стекло, может стать проводником, если его нагреть. Все это, конечно, означало, что проводимость зависит от химических и физических свойств вещества.

Направленное перемещение электрических зарядов в проводнике назвали электрическим током. Теперь надо было выяснить, при каких условиях можно его поддерживать в проводниках. К решению этой задачи подошли несколько неожиданным путем.

### Скальпель Гальвани, столб Вольта и дуга Петрова

Живший в Болонье профессор анатомии Луиджи Гальвани, подобно многим своим современникам, увлекался электрическими явлениями и пользовался в опытах электрической машиной, которая позволяла разделять электрические заряды, образующиеся от трения вращающегося диска (рис. 12). Заряды стекали на два металлических шара. Когда зарядов накапливалось много, между шарами проскакивала искра, подобная той, которую наблюдал Герике.

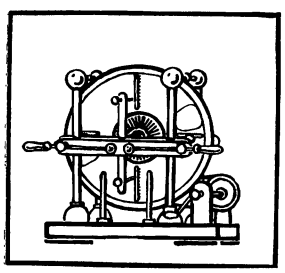


Рис. 12.

Однажды Гальвани препарировал лягушку, а рядом потрескивала электрическая машина. О том, что случилось дальше, он рассказал в книге «Трактат о силах электричества при мускульном движении»: «Когда один из помогавших мне случайно чуть-чуть коснулся концом скальпеля до внутреннего бедренного нерва лягушки... все мускулы этого сочленения сократились несколько раз, как будто в них произошли сильные токсические* судороги. Другой человек, помогавший нам при электрических опытах, как ему показалось, заметил, что это происходило, когда из кондуктора машины извлекалась искра... Меня охватила неимоверная жажда и рвение исследовать это явление и пролить свет на то, что было за ним скрыто».

Гальвани не удалось пролить свет на это загадочное явление: слишком сложны были электромагнитные явления для ученых той поры. Но опыт Гальвани помог естествоиспытателям открыть источники электрического тока.

Итальянский физик Алессандро Вольта обратил внимание на то, что мускулы лягушки сокращаются особенно сильно, если их касаться двумя разнородными металлами, например медью и железом. Он даже предположил, что разнородные металлы при соприкосновении становятся источником тока.

20 марта 1800 г. Вольта написал свое знаменитое письмо, в котором сообщал, что найден постоянно действующий источник электричества:

«... Я взял несколько дюжин круглых медных пластинок — серебряные еще лучше — приблизительно в один дюйм диаметром и такое же число оловянных или лучше цинковых пластинок. Затем из пористого материала, который может впитывать и удерживать много жидкости (картон, кожа), я нарезал достаточное число кружков. Все эти пластинки я расположил таким образом, что металлы накладывались друг на друга всегда в одном и том же порядке и что каждая пара пластинок отделялась от следующей влажным кружком из картона или кожи».

Далее он рассказывает, что если коснуться одной рукой верхней пластинки, а другой — нижней, то почувствуешь сильный электрический удар. Такой же удар, какой испытывают пловцы, нечаянно натолкнувшиеся на электрического угря.

Много лет спустя стало известно, что вдоль хвоста у электрического угря (о котором упоминал Вольта в своем письме) расположены две электрические батареи, каждая содержит около 6 тыс. изолированных клеток. В результате мгновенных химических реакций непроводящая ткань изоляции приобретает способность проводить ток. Электрический разряд происходит мгновенно при напряжении до 600 *в* и может убить другое животное или человека.

Вольтов столб, таким образом, стал источником, поддерживающим перемещение электрических зарядов по проволоке, которой замкнуты его полюсы. Это была первая электрическая батарея, сделанная руками человека.

В 1802 г. русский академик В. В. Петров собрал вольтов столб необычных размеров. На заседании научного общества он изумил всех присутствующих негаснущей искрой. Ослепительное электрическое пламя имело вид дуги.

* Вызванные действием ядовитого вещества.

В 1803 г. В. В. Петров выпустил книгу с длинным названием: «*Известие о гальвани-вольтовых опытах, которые проводил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоявшей иногда из 4200 медных и цинковых кружков и находящейся при Санкт-Петербургской медико-хирургической академии*». В этой книге предполагалась возможность плавить металлы с помощью электрической дуги, которая возникает между кусочками древесного угля, соединенными с полюсами батареи. В 1882 г. в России начались первые опыты с электросваркой металлов посредством вольтовой дуги, или «дуги Петрова». А еще раньше, в 1876 г., улицы европейских столиц осветились сиянием дуговых ламп, сконструированных русским изобретателем П. Н. Яблочковым.

### Первые источники электрического тока— гальванические элементы

Элементов этих много, каждый носит имя своего изобретателя, но у всех у них есть и общее название — гальванические.

Действие гальванического элемента объясняется химическими реакциями, энергия которых преобразуется в электрическую. Процесс преобразования, естественно, сопровождается известными потерями, величина которых зависит от устройства проводников и типа химических реакций. Действие элементов характеризуют физической величиной — электродвижущей силой (ЭДС), единица измерения которой — *вольт*.

ЭДС первых элементов была очень мала, но ее оказалось достаточно, чтобы исследователи открыли законы электрического тока. Основные законы постоянного тока установил в 1826 г. немецкий физик Георг Ом. Закон Ома определяет силу тока ($I$) в проводнике при данной ЭДС, ($E$) источника тока и данных сопротивлениях источника ($r$) и проводника ($R$):

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Силу тока определяют величиной заряда, прошедшего через поперечное сечение ($q$) проводника в единицу времени ($t$):

$$I = \frac{q}{t}.$$

Речь здесь идет о постоянном токе, при котором направление движения зарядов по проводнику не меняется.

### Признаки электрического тока

О наличии электрического тока мы судим по разным признакам: по теплу, которое развивается в твердых проводниках (проволоку можно накалить до яркого свечения); по выделению вещества из раствора электролитов, по цветному свечению газов. Эти признаки называют частными, так как они сопутствуют току, проходящему через вещество; они положены в основу электроизмерительных приборов и устройств, очень распространенных в технике.

Например, ослепительное свечение раскаленного проводника привело А. Н. Лодыгина и Т. Эдисона к мысли создать электрическую лампочку. Выделение вещества при прохождении тока через электролит помогло М. Фарадею открыть законы электролиза, а Б.С. Якоби — заложить основы гальванопластики и гальваностегии. При этом глубже была исследована и природа электрического заряда. Электрический заряд наименьшей величины назван **элементарным.** Если вещество при электролизе одновалентно, то его грамм-атом будет выделен прошедшим через раствор зарядом, равным числу Фарадея:

$$F = N \cdot e,$$

где $N$ — число Авогадро, $F$ — число Фарадея, а $e$ — элементарный заряд, величину которого можно вычислить так:

$$e = \frac{F}{N} = \frac{96\,520}{6{,}02 \cdot 10^{23}} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ к.$$

Это открытие указывает на связь электрического заряда с атомным строением веществ.

По количеству серебра, выделенного из раствора $AgNO_3$, впервые установили единицу измерения силы тока ампер.

## ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Общий признак электрического тока — его влияние на магнитную стрелку — обнаружили при своеобразных обстоятельствах. Датский физик Ханс Кристиан Эрстед во время лекции об электричестве и магнетизме заметил, что магнитная стрелка компаса уклоняется от своего направления. После лекции он установил, что вблизи от компаса находился провод, который соединял полюсы гальванического элемента. Как только элемент замыкался, стрелка меняла направление. Эрстед долго

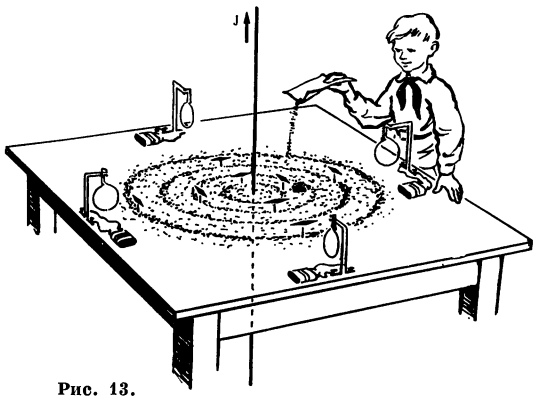



Рис. 13.

размышлял над этим странным явлением, экспериментировал со стрелками и железными опилками, которые в момент замыкания располагались кругами вокруг провода (рис. 13). Наконец, в 1820 г. он установил связь между магнетизмом и электричеством. Затем было установлено, что магнетизм сопутствует току и в проводниках, и в электролитах, и в газах, а это значит, что действие на магнитную стрелку — общий признак электрического тока.

Французские физики Ж. Био и Ф. Савар осенью того же 1820 г. установили, что каждая часть проволоки с током действует на магнитный полюс. Это исследование привело к закону взаимодействия тока и магнитного полюса.

Число опытов, которые обнаруживали взаимодействие постоянного магнита с электрическим током, текущим по проволокам различной формы, быстро увеличивалось. Среди них привлекает внимание опыт, при котором электрический ток пропускали через катушку проволоки — с о л е н о и д. На концах катушки было обнаружено два противоположных полюса, ничем не отличавшиеся от полюсов магнита (рис. 14). Эти полюсы вступали с магнитом во взаимодействие. Полюсы появлялись даже при одном витке. Такой двухполюсный виток, помещенный вблизи магнита или проводника с током, вел себя подобно магнитной стрелке (рис. 15).

Другой опыт провел французский физик

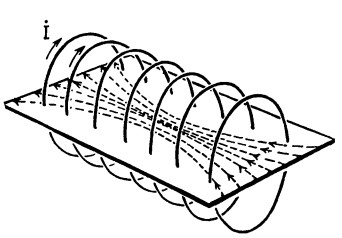



Рис. 14.

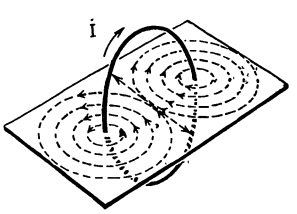



Рис. 15.

Доминик Араго. Он поместил стальной стержень в стеклянную трубку, обмотанную медной проволокой, пропустил по проволоке ток — стержень намагнитился (рис. 16). Так была открыта возможность намагничивания при помощи электрического тока. Это открытие сыграло важную роль для выявления связи между электричеством и магнетизмом.

Андре Ампер, узнав об опытах Эрстеда, продолжил их и установил, что два параллельных проводника притягиваются друг к другу, если токи в них направлены в одну сторону, и отталкиваются, если токи направлены в противоположные стороны.

Опыты Ампера позволили обнаружить закон, определяющий величину и направление сил, которые действуют на проводник с током, если он помещен между полюсами магнита, т. е. в магнитном поле. Направление силы определяют с помощью известного из курса физики правила «левой руки» (рис. 17).

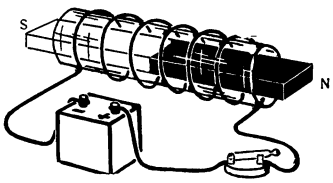



Рис. 16.

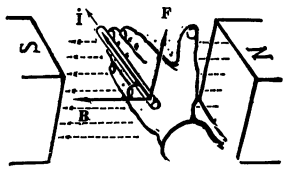



Рис. 17.

Амперу принадлежит гипотеза о сущности намагничивания. Он предположил, что причину намагничивания следует искать в существовании круговых молекулярных токов. Токи эти, подобно магнитным стрелкам, имеют два полюса и поэтому устанавливаются в направлении намагничивания.

Ученые встретили гипотезу Ампера благожелательно, но она многое не объясняла. Взять хотя бы наблюдения Фарадея над тем, как ведут себя между полюсами магнитов стержни из различных веществ. Их поведение позволило разделить все вещества на **парамагнитные** и **диамагнитные**. Стержни первых тел между полюсами устанавливаются вдоль силовых линий, стержни вторых — перпендикулярно к ним. Это явление объяснили позже, когда стало ясным строение атома.

## Электромагнитная индукция

Майкл Фарадей родился в 1791 г. в семье бедного кузнеца, в предместье Лондона. Тринадцати лет он поступил в обучение к пере-

плетчику и каждую свободную минуту читал. Больше всего его увлекали загадки природы. В 1810—1812 гг. он прослушал курс лекций о естествознании, в том числе и лекции знаменитого химика Гемфри Дэви. В конце концов он решил оставить работу у переплетчика и попросил Дэви взять его к себе в помощники. Дэви предложил ему место лаборанта.

В 1813 г. Фарадей сопровождал своего учителя в поездке по Франции и Италии, познакомился там с крупными учеными. По возвращении он продолжал свою работу и вскоре стал блестящим экспериментатором и лектором. Образцом этих лекций служит «История свечи», которая читается с интересом и в наши дни. В 1824 г. Фарадей был избран членом Королевского общества, с 1825 г. стал директором лабораторий Королевского института.

Вначале Фарадей увлекался химией, но затем посвятил себя обессмертившим его имя опытам с магнитными и электрическими явлениями. Он приступил к этим опытам не сразу. Хотя он постоянно носил с собой магнитик, чтобы не забывать о том, что пора, давно пора заняться магнетизмом. Административная работа в Королевском институте долго отвлекала его от этого. Сообщения об опытах Араго заставили Фарадея, наконец, бросить другие занятия, и он принялся за эксперименты. К осени 1831 г. он получил электрический ток в проволоке под влиянием магнетизма и назвал новое явление электромагнитной индукцией.

В записной книжке Фарадея появился рисунок (рис. 18), снабженный таким описанием: «У меня было железное кольцо (из мягкого

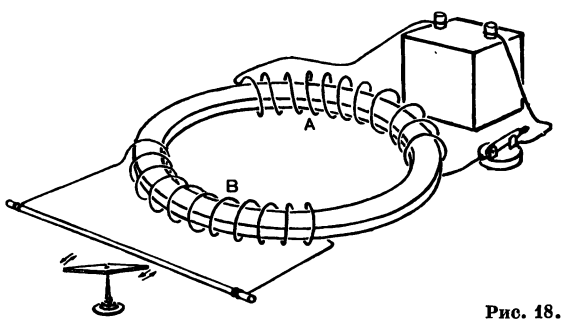



Рис. 18.

железа) толщиною $^7/_8$ дюйма и с внешним диаметром 6 дюймов. Я обмотал медную проволоку много раз (вокруг железного кольца), причем одна половина обмотки была изолирована от другой посредством ниток и кусочков ситца; в моем распоряжении было три проволоки, каждая длиною в 24 фута: их можно было связать в одно или пользоваться каждой в отдельности... Назову одну сторону кольца $A$. Другая сторона $B$ была обмотана двумя проволоками, общая длина коих равнялась 60 футам. Обороты $A$ и $B$ шли в одном и том же направлении. Я соединил проволоки в одну проволоку и привязал ее концы к медной проволоке, проходившей очень близко над магнитной стрелкой. Затем я замкнул электрический ток батареи посредством одной из проволок $A$. Магнитная стрелка мгновенно вышла из своего положения, стала качаться вперед и назад; вскоре, однако, она пришла в спокойное состояние, заняв первоначальное положение. Когда я затем прерывал ток, стрелка снова выходила из своего положения».

Фарадей сделал вывод: при намагничивании железного кольца, вызванного током в обмотке $A$, наводится (индуктируется) ток в обмотке $B$. Это легко обнаружить при помощи магнитной стрелки, расположенной вблизи медной проволоки, замыкающей обмотку $B$. Железное кольцо, как только потечет ток в обмотке $A$, становится магнитным, как и в опыте Араго. В этот момент в обмотке $B$ возникает ток, который может быть обнаружен магнитной стрелкой, как в опыте Эрстеда. Обратите внимание, что опыты Эрстеда и Араго тесно переплетаются в новом опыте Фарадея.

Явление электромагнитной индукции было открыто Фарадеем в 1831 г., а в 1833 г. петербургский академик Э.Х. Ленц предложил правило, которое позволяет определить направление возбуждаемого электрического тока.

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитные исследования Кулона помогли вывести законы взаимодействия магнитных полюсов; исследования Ампера — закон взаимодействия проводников с токами, а также проводника с током и магнита. Величина силы $F$, действующей на помещенный между полюсами магнитов проводник с током, пропорциональна силе тока ($I$), длине проводника ($l$) и синусу угла между направлением тока и тем направлением, по которому устанавливается магнитная стрелка там, где расположен проводник:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha.$$

То, что в формуле участвует синус угла означает, что величина действующей силы зависит от ориентации проводника с током. Величина $F$ будет

наибольшей, когда угол прямой. При этом $\sin\alpha = 1$.

Некоторые из ученых объяснили взаимодействия магнитных полюсов, магнитного полюса и тока, проводников с током действием на расстоянии, без участия окружающей среды **(теория дальнодействия)**. Другие придерживались мнения Фарадея: полюса взаимодействуют благодаря особому состоянию среды, которое вызывается присутствие магнитного полюса или проводника с током (**теория близкодействия**). Дальнейшие исследования подтвердили правильность второй точки зрения.

Магнитный полюс или проводник с током создают вокруг себя магнитное поле. В каждой точке этого поля его силовое действие на проводник с током характеризуют определенной величиной —наибольшей силой, с которой действует поле на проводник длиной в 1 *м* при силе тока в 1 *а*. Силовая характеристика магнитного поля называется **индукцией**. Согласно закону Ампера индукция $B$ определяется отношением силы $F$ на произведение силы тока $I$ и длины проводника $l$.

Индукция — это вектор, направление которого в каждой точке магнитного поля совпадает с направлением магнитной стрелки:

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

Магнитное поле удобно изображать графически при помощи силовых линий. Касательная к силовой линии указывает направление вектора индукции магнитного поля (рис. 19). Если в данном месте магнитное поле по какой-либо причине изменится, это означает, что изменяются величина и направление вектора индукции.

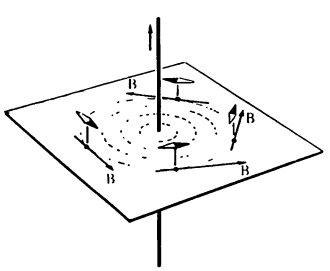


Рис. 19.

В Международной системе единиц измерения для индукции поля установлена единица тесла. Эта единица названа в честь югославского ученого Николы Тесла. Она определяется величиной силы, действующей на электрический ток в 1 *а* при длине проводника в 1 *м*.

В этом томе есть специальная статья о системах измерения физических величин. И тем не менее здесь уместно рассказать о некоторых единицах Международной системы, имеющих отношение к электромагнитным явлениям. В этой системе формулы, чаще всего употребляемые, записаны наиболее просто. Но это только внешняя сторона системы измерительных единиц. Существенное же в ней то, что в запись основных законов введены постоянные $\mu_0$ и $\varepsilon_0$. Физическое содержание этих постоянных раскрыто в уравнениях Максвелла.

В Международной системе (СИ) 6 основных единиц и 2 дополнительных (см. ст. «Одна мера всему миру»).

Для описания механических явлений достаточно первых трех единиц этой системы измерений: метра, килограмма и секунды. Описание явлений, электрических и магнитных, требует четвертой единицы — силы тока. Эти четыре единицы позволяют выразить единицы всех физических величин, характеризующих электричество и магнетизм.

Основным законом магнитных явлений в системе СИ считается закон Ампера, который определяет силу взаимодействия прямых параллельных токов. Ампер рассматривал взаимодействие в воздухе, но величина силы не изменится, если влиянием воздуха пренебречь и представить себе явление происходящим в вакууме:

$$F = k\frac{I_1 \cdot I}{r}\,l,$$

где коэффициент $k$ зависит от единиц измерения силы токов $I_1$ и $I$ при расстоянии между ними $r$, длине проводников $l$ и действующей на них силы $F$. Сила тока — основная единица. Она установлена на основании закона Ампера. Единица ее измерения — *а* (ампер).

Ампер—это сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 *м* один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками на каждый метр их длины силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы, принятых в СИ (см. ст. «Всему миру единую меру»).

Если измерять все эти величины в единицах Международной системы, т. е. токи в амперах, расстояние и длину в метрах и силу в ньютонах, то коэффициент $k$ будет равен $2 \cdot 10^{-7}$.

Чтобы упростить остальные формулы электромагнитных измерений, в числитель и знаменатель этой формулы вводится коэффициент $4\pi$ (формула, так сказать, рационализируется):

$$F = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2 \cdot I_1 \cdot I}{4\pi r} \cdot l.$$

Коэффициент $4\pi \cdot 10^{-7}$ обозначают как $\mu_0$. Закон Ампера при этом запишется так:

$$F = \mu_0 \cdot \frac{2 \cdot I_1 \cdot I}{4\pi r} \cdot l ,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{в \cdot сек}{а \cdot м}$. Это так называемая магнитная постоянная вакуума.

Если токи поместить в магнетик, т. е. в среду, которая влияет на силу взаимодействия, сила эта изменится; ее изменение учитывается относительной магнитной проницаемостью среды. Эта величина ($\mu$) показывает, во сколько раз по сравнению с вакуумом увеличится или уменьшится сила:

$$F = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{2 \cdot I_1 \cdot I}{4\pi r} \cdot l .$$

Рассматривая взаимодействие прямых параллельных проводников с током, из которых один создает магнитное поле, а другой испытывает на себе силовое действие поля, находим, что индукция магнитного поля, создаваемая прямым током $I_1$, равна:

$$B = \frac{F}{I \cdot l} = \mu\mu_0 \frac{2I_1}{4\pi r} .$$

Учитывая это, легко объяснить, почему силовые линии магнитного поля, которое вызвано прямым током, расположены по концентрическим окружностям вокруг проводника с током, как вокруг оси. Чтобы упростить вычисление индукции $B$, которая создается токами различной формы, вводят новую характеристику магнитного поля — напряженность $H$:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H.$$

Напряженность магнитного поля $H$ специального названия не имеет, в Международной системе измеряется единицей *а/м*.

В явлении электромагнитной индукции, открытом Фарадеем, особое значение имеет понятие потока индукции. Поток определяется как произведение площади $S$, расположенной перпендикулярно к направлению поля, на величину вектора индукции $B$, т. е.:

$$\Phi = BS.$$

В Международной системе поток индукции измеряется единицей вебер.

По правилу Ленца легко можно найти направление индуктированного тока. Ток имеет такое направление, при котором его магнитное поле направлено противоположно изменению создавшего его магнитного потока.

Опираясь на закон сохранения энергии, немецкий ученый Герман Гельмгольц выразил закон Фарадея математически:

$$E^{инд} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Этот закон определяет величину ЭДС (электродвижущей силы), которая возбуждает электрический ток, наводимый изменяющимся потоком индукции $\Delta\Phi$ за малый промежуток времени $\Delta t$.

Знак «минус» указывает направление тока, определяемое правилом Ленца. Электродвижущая сила измеряется в системе СИ в вольтах.

## Генератор переменного тока

После открытия и исследования электромагнитной индукции стала очевидной возможность создать генератор, который сможет преобразовывать механическую энергию в энергию электрическую. Для получения тока в замкнутом витке проволоки нужно изменять пронизывающий его поток индукции. Сделать это можно двояким путем: либо перемещать магнит относительно витка проволоки, либо перемещать виток проволоки относительно магнита.

Первый генератор электрического тока, построенный в 1832 г., был весьма несовершенен. Посмотрите на его изображение (рис. 20): вы видите, что ЭДС в обмотках его катушек возбуждалась вращением подковообразного магнита. Ток, создаваемый такой машиной, был не похож на ток от гальванического элемента — он как бы метался из стороны в сторону, то и дело меняя свое направление. Этот ток назвали переменным, в отличие от постоянного тока, производимого гальваническим элементом.

По-иному был сконструирован другой генератор: рамка проводника вращалась между неподвижными полюсами магнита. Ее концы соединялись с двумя кольцами на оси вращения рамки, а к кольцам при помощи скользящих контактов подключалась электрическая цепь. На контактах колец возникал то «плюс», то «минус», что и означало генерирование переменной ЭДС.

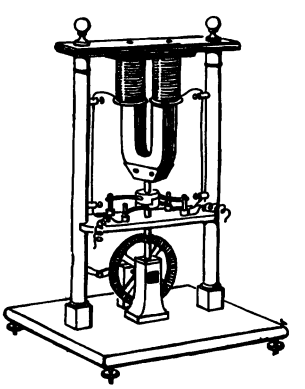


Рис. 20.

То, что ток получался переменным, сочли

недостатком и принялись искать способ его выпрямить. Для этого прибегли к так называемому **коммутатору**. Во второй машине, например, оба конца рамки подсоединили к кольцу, которое разрезали пополам, и изолировали каждую половину слоем не проводящего ток вещества. Один скользящий контакт касался только того конца вращающейся рамки, на котором был «плюс», а второй контакт замыкался на «минусе». Но хотя ток в цепи и стал постоянным по направлению, его величина менялась с каждым полуоборотом рамки. Чтобы избежать резких изменений величины тока, увеличили количество рамок. Их концы подсоединили к диаметрально противоположным участкам разрезанного кольца-коллектора. Ток от такой машины тем более похож на постоянный, чем больше рамок на вращающемся барабане — р о т о р е (неподвижные магниты в такой машине называют с т а т о р о м).

**Униполярная машина.** Рассмотрим движение проводника длиною $L$ в плоскости, перпендикулярной направлению поля, когда один конец проводника неподвижен, а другой описывает окружность. Электродвижущая сила на концах проводника определяется формулой закона электромагнитной индукции:

$$E^{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Изменение потока индукции (рис. 21) выразится произведением площади малого сектора $\Delta S$, которую опишет проводник при вращении с угловой скоростью $\omega$ за время $\Delta t$, на индукцию магнитного поля $B$, в котором движется проводник:

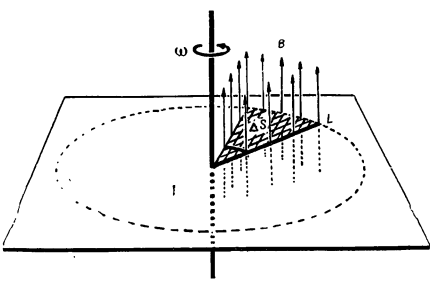



Рис. 21.

$$\Delta\Phi = B\Delta S = B\cdot\frac{1}{2}\cdot L^2\cdot\omega\Delta t.$$

Величина ЭДС выразится так:

$$E^{\text{инд}} = -\frac{1}{2}\cdot B\cdot L^2\cdot\omega.$$

Машина, работающая по этой схеме (рис. 22), может быть построена, если проводник заменить проводящим диском, который вращается относительно оси, расположенной параллельно магнитному полю. Электрическую цепь следует подключить одним концом к оси диска, а другим — к его краю с помощью скользящего контакта. Машина эта называется у н и п о л я р н о й, так как она генерирует ток одного направления.

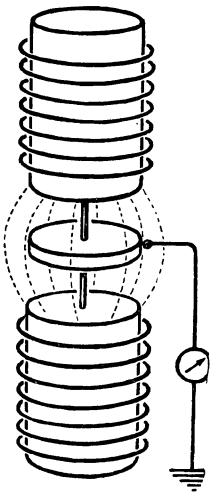


Рис. 22.

ЭДС униполярной машины тем больше, чем больше индукция магнитного поля, радиус диска и угловая скорость вращения. Усилить индукцию магнитного поля постоянных магнитов нельзя, но их можно заменить катушкой проволоки и пропускать по ней постоянный ток; поток индукции, создаваемый катушкой, пропорционален силе протекающего в ней тока. Униполярная машина очень проста, но она в состоянии создать очень большую ЭДС и, значит, постоянный ток большой силы.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Если размеры наэлектризованных тел по сравнению с расстоянием между ними малы, то величина силы, с которой они взаимодействуют, определяется законом Кулона. Трудность, как и в решении проблемы взаимодействия намагниченных тел, была связана с пониманием, как действуют заряды. И в этом случае одержала верх «теория близкодействия»: каждый из электрических зарядов возбуждает вокруг себя э л е к т р и ч е с к о е п о л е, которое оказывает действие на другой заряд.

Силовая характеристика электрического поля — н а п р я ж е н н о с т ь. Она определяется силой, действующей на единичный положительный заряд в каждой точке поля:

$$E = \frac{F}{q}.$$

В Международной системе единиц (т. е. в системе СИ) сила $F$ измеряется единицей *н* (ньютон), а заряд $q$ — единицей *к* (кулон). У единиц напряженности электрического поля нет специального названия, она измеряется единицей *н/к*. Напряженность поля удобнее измерять единицей *в/м*, которая выводится из уравнений $н\cdot м = дж$ и $дж = к\cdot в$.

Электрическое поле удобно изображать графически с помощью силовых линий; касательные, нанесенные в каждой точке этих силовых линий, определят направление вектора напряженности поля.

Теперь обратимся к электрическим явлениям. Для них основной закон — закон Кулона. Он определяет взаимодействие точечных зарядов в вакууме:

$$F = k \cdot \frac{q_1 q}{r^2},$$

где $k$ — коэффициент, зависящий от выбора единиц для измерения зарядов $q_1$ и $q$, расстояния между ними $r$ и силы $F$, приложенной к каждому заряду.

При измерении этих величин в единицах Международной системы, т. е. зарядов в кулонах ($а \cdot сек$), расстояния в метрах и силы в ньютонах, коэффициент $k$ будет равен $9 \cdot 10^9$, а формула приобретет следующий вид:

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{q_1 q}{r^2}.$$

Введем в нее коэффициент $4\pi$ так же, как это было сделано в формуле закона Ампера:

$$F = \frac{q_1 q}{4\pi \left(\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}\right) r^2}.$$

Заменив $\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$ обозначением $\varepsilon_0$, получим закон Кулона в рационализированой форме:

$$F = \frac{q_1 q}{4\pi\varepsilon_0 r^2},$$

где $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{а \cdot сек}{в \cdot м}$. Эта величина называется электрической постоянной вакуума.

Если же поместить заряды в диэлектрик, т. е. в среду, которая влияет на силу взаимодействия, величина силы изменится и придется учитывать относительную диэлектрическую проницаемость среды $\varepsilon$:

$$F = \frac{q_1 q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}.$$

Рассматривая взаимодействие зарядов с точки зрения теории близкодействия ($q_1$ образует поле, а $q$ испытывает его действие), находим напряженность электрического поля для точечного заряда:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}$$

и находим силу, действующую на заряд в любой точке поля:

$$F = Eq.$$

Чтобы упростить вычисление силовой характеристики поля ($E$), Максвелл ввел новую характеристику — $D$: электрическое смещение:

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E.$$

В Международной системе для $D$ нет специального названия. Электрическое смещение измеряется единицей

$$\frac{а \cdot сек}{м^2}, \text{ т. е. } \frac{\text{кулон}}{м^2}.$$

Таким образом, электрическое смещение можно рассматривать как характеристику образования электрического поля в среде, когда заряды, связанные в атомах и молекулах вещества, смещаются. Мера этого процесса — заряд, сместившийся через единицу поверхности.

Таким образом, в основные законы были введены две постоянные, характеризующие вакуум,— электрическая $\varepsilon_0$ и магнитная $\mu_0$. При этом само понятие вакуума обогатилось новым содержанием, которое расширяет наше представление об отвлеченном безвоздушном пространстве.

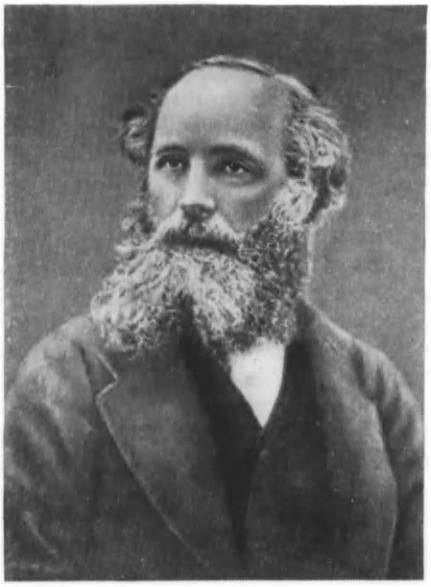
## ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

### Новое содержание закона электромагнитной индукции

Джемс Клерк Максвелл родился в том же году, когда Фарадей открыл электромагнитную индукцию. Через 30 лет Максвелл обогатил открытие Фарадея более глубоким физическим содержанием, а затем разработал теорию взаимосвязи электрических и магнитных явлений — теорию электромагнитного поля.

Изучая электромагнитную индукцию, Максвелл обратил внимание на то, что Фарадей не заметил. Его заинтересовала причина, порождающая ток в проводнике, когда магнитное поле изменяется. Он хотел понять, как и почему это происходит.

Ток — это перемещение свободных зарядов в проводнике. Они приходят в движение, лишь когда существует электрическое поле. А единственная возможность появления электрического поля связана в свою очередь с изменением магнитного поля, в котором находится проводник. Учитывая это, можно представить себе явление электромагнитной индукции так: при изменении магнитного поля вокруг него возникает вихре-



Джемс Клерк Максвелл.

вое электрическое поле с замкнутыми силовыми линиями. Обнаружить это электрическое поле проще всего с помощью витка проволоки, в котором возникает ток свободных зарядов.

Таким образом, ЭДС индукции определяется в законе Фарадея величиной работы сил электрического вихревого поля, которое возбуждается вокруг изменяющегося магнитного поля.

Скорость, с которой изменяется поток индукции магнитного поля, т. е. величина $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, измеряется в вольтах. Физическую сущность открытого Фарадеем явления Максвелл выразил кратко одним уравнением, которое носит его имя:

$$\oint_l \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Эта формула записана символами высшей математики. Она означает, что силовые линии электрического поля вокруг изменяющегося потока индукции магнитного поля замкнуты, т. е. это вихревое поле.

Обратите внимание: линии электростатического поля начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных.

Обнаружив способность изменяющегося магнитного потока создавать вихревое поле, Максвелл начал искать связь между электрическими и магнитными явлениями. У него появилась идея, что вихревое магнитное поле возникает вокруг изменяющегося потока электрического поля. Этот поток определяется произведением площади $S$, расположенной в данном месте, на величину вектора $D$ (рис. 23), т. е.

$$N = DS.$$

Единица, которой измеряется поток вектора электрического смещения,— кулон. Поток $N$ изменится, проходя через площадь $S$, лишь в том случае, если изменится вектор электрического смещения, т. е.

$$\Delta N = \Delta D \cdot S.$$

Скорость изменения потока $N$ определяется величиной $\frac{\Delta N}{\Delta t}$ и измеряется амперами.

Изменяющийся поток электрического поля, по предположению Максвелла, создает вокруг себя магнитное поле, ничем не отличающееся от поля электрического тока. Его сила зависит от скорости, с которой изменяется поток электрического поля. Величину этой скорости Максвелл назвал током смещения:

$$I_{см} = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

Гипотеза Максвелла о том, что вокруг токов смещения существует магнитное поле, указывала на связь между двумя полями. Она была подтверждена остроумным опытом московского профессора А. А. Эйхенвальда и стала теорией.

Понятие «ток смещения» стало равноправным с понятием «ток проводимости». Оно позволило Максвеллу написать второе уравнение, которое связывало изменение потока электрического поля с возникающим вокруг него магнитным полем:

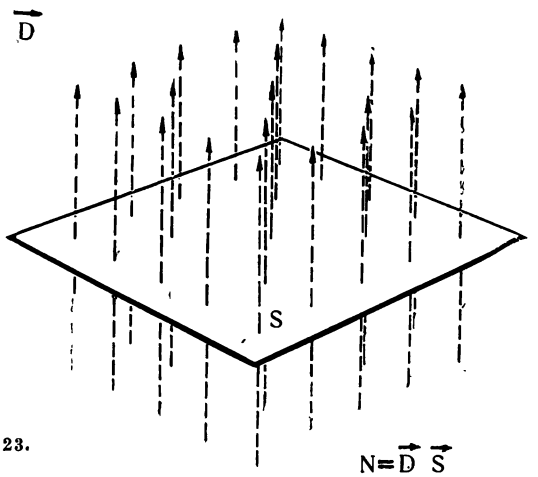



Рис. 23.

$$\oint_l \vec{H}d\vec{l} = \sum_{k=1}^{n} I_k + \frac{dN}{dt}.$$

Из уравнений Максвелла следует, что связь электрического и магнитного полей обнаружи-

вается при их изменениях: изменяющееся магнитное поле порождает вокруг себя вихревое электрическое, а изменяющееся электрическое — вихревое магнитное поле. Совокупность двух переменных полей называется **электромагнитным полем.**

Математические исследования этой взаимосвязи Максвелл опубликовал в книге «Трактат об электричестве и магнетизме», которая вышла в 1873 г.

## Электромагнитная природа света

Открытие взаимосвязи полей позволило по-иному увидеть многие из явлений природы. Но прежде чем рассказать об этом, напомним весьма кратко о волновых процессах в физических телах.

Всем известно, как создаются звуковые волны в воздухе. Вы хлопаете в ладоши, воздух уплотняется, и благодаря его объемной упругости уплотнение распространяется во все стороны. Скорость распространения зависит от свойств и состояния среды — от давления, плотности, теплоемкости. При распространении звуковой волны частицы воздуха приходят в движение — колеблются около положения равновесия по направлению распространения волны. Звуковые волны в воздухе называют продольными.

То же можно сказать и о распространении волн в жидкости: скорость распространения определяется физическими свойствами и состоянием среды, и прежде всего ее упругостью и плотностью.

В твердых же телах благодаря их упругости при растяжении, сжатии, сдвиге и кручении можно создавать и продольные и поперечные волны; скорость распространения волн определяется величиной упругости и плотностью твердого тела.

Таким образом, физическое содержание волнового процесса заключено в распространении местного возмущения среды (газообразной, жидкой или твердой) во все стороны благодаря тому или иному виду упругости.

Теперь вернемся к электромагнитному полю и к уравнениям Максвелла. Математические преобразования этих уравнений приводят к выводу, что даже в вакууме, т. е. в пространстве, где нет вещества в привычных для нас формах, распространяется электромагнитное возмущение. Изменяющийся поток индукции возбуждает вихревое электрическое поле; оно, изменяясь, в свою очередь возбуждает вихревое магнитное поле. Процесс захватывает одну точку пространства за другой и распространяется во все стороны от места своего возникновения. Распространяющееся электромагнитное поле называется **электромагнитной волной.**

Из уравнений, описывающих этот процесс, следует, что электромагнитное поле распространяется в вакууме не с бесконечной скоростью, так как она выражена через электрическую постоянную вакуума $\varepsilon_0$ и магнитную постоянную вакуума $\mu_0$:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

Подставив значения постоянных

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \frac{а \cdot сек}{в \cdot м} \text{ и } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{в \cdot сек}{а \cdot м},$$

получим $c$ величину скорости распространения электромагнитных волн в вакууме:

$$c = 3 \cdot 10^8 \, м/сек.$$

Если распространение происходит в какой-либо среде, то скорость зависит от относительной диэлектрической и магнитной проницаемости среды $\varepsilon$ и $\mu$:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}.$$

Сейчас мы спокойно относимся к тому, что электромагнитное поле распространяется со скоростью в 300 000 000 *м/сек*, но в свое время эта величина произвела ошеломляющее впечатление на весь ученый мир. Она была несравнима ни со скоростью распространения упругих волн в воздухе, т. е. звука (330 *м/сек*), ни со скоростью их распространения в воде (1500 *м/сек*), ни со скоростью их распространения в твердом теле (5000 *м/сек*). Все эти волны наблюдали не раз, не раз вычисляли их скорости, но волны Максвелла никто не наблюдал — они появились из уравнений, среди которых только уравнение электромагнитной индукции считалось достоверным, а второе уравнение вытекало лишь из гипотезы.

С другой стороны, в ту пору была известна одна скорость, которая совпадала со скоростью волн Максвелла. Это — скорость света. Французские физики И. Физо (в 1849 г.) и Ж. Фуко (в 1850 г.) измерили скорость света в земных условиях и получили результат, весьма близкий к 300 000 000 *м/сек*. Что же касается природы света, то общепризнанным было представление

о нем как об упругих волнах, распространяющихся в особой среде (эфире), которая заполняет весь мир и проникает во все тела.

Очевидное совпадение величин дало Максвеллу повод предположить, что свет обладает электромагнитной природой. Другим поводом для этого послужило открытое в 1846 г. Фарадеем явление: плоскость поляризации света вращается в магнитном поле.

Современники не приняли предположение Максвелла. Они требовали экспериментов, которые подтвердили бы тождественность электромагнитных и световых волн. В то время опыт уже считался единственным критерием истины.

В 1880 г. А. Майкельсон приступил к грандиозным экспериментам в измерении скорости света. Метод измерения он совершенствовал почти полвека и в 1927 г. получил наиболее точный, бесспорный результат ($299\,796 \pm 4$ *км/сек*). Профессор Московского университета Н. А. Умов примерно в то же время пришел к выводу, что от источника упругая волна несет с собой в пространство энергию. Теоретические выводы Умова позволили голландскому ученому Пойтингу вычислить поток плотности энергии в электромагнитной волне. Тогда же казанский профессор Д. А. Гольдгаммер вычислил давление, которое должна была бы производить электромагнитная волна при падении на преграду.

Однако никто не проводил опыты с электромагнитными волнами, так как не известно было, как эти волны получать. Сталкиваясь на каждом шагу с этими волнами (при электрическом разряде, при включении цепей тока и т. д.), физики не связывали эти явления с работами Максвелла.

Но вот в 1889 г. немецкий физик Генрих Герц завершил блестящую серию опытов с неизвестным до того излучением, которое испускалось разрядником, соединенным с катушкой Румкорфа. Излучение хорошо принималось аналогичной системой.

Волновой характер излучения был проверен на таких известных свойствах упругих волн, как отражение, преломление, интерференция и дифракция. Эти опыты были проведены русским физиком П. Н. Лебедевым. Он же измерил величину давления света. Этот эксперимент завершил всю серию исследований, доказавших электромагнитную природу света.

Результаты опытов совпали с теорией Максвелла. Это доказывает, что излучение, открытое Герцом, не что иное, как электромагнитные волны, а свет — электромагнитные волны, воспринимаемые органами зрения.

## Полная система уравнений Максвелла

В первоначальной теории Максвелла уравнения, устанавливающие связь между магнитным и электрическим полями, были довольно громоздкими. За математическими символами не сразу можно разглядеть физическую сущность явления, которое они описывают. И тем не менее Герц писал: «Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такое чувство, будто в математических формулах есть самостоятельная жизнь, собственный разум — как будто они умнее нас, умнее даже своего автора, будто они дают нам больше, чем в свое время было в них вложено».

Герц придал уравнениям Максвелла четкую, математически и физически ясную форму, и их по справедливости называют **уравнениями Максвелла — Герца**. Они взаимосвязаны и выглядят в единицах Международной системы измерений так:

$$\text{I.}\quad \oint_l \vec{E}\vec{dl} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Это уравнение говорит о том, что вокруг изменяющегося потока индукции магнитного поля возникает вихревое электрическое поле.

$$\text{II.}\quad \oint_l \vec{H}\vec{dl} = \sum_{k=1}^{n} I_k + \frac{dN}{dt}.$$

Это уравнение утверждает: магнитное поле вокруг тока, текущего по проводнику, ничем не отличается от того, которое возникает вокруг изменяющегося потока электрического смещения.

$$\text{III.}\quad \oint_S \vec{D}\vec{dS} = \sum_{k=1}^{n} q_k.$$

Это уравнение показывает, что силовые линии электростатического поля начинаются и оканчиваются на зарядах электричества либо уходят в бесконечность.

$$\text{IV.}\quad \oint_S \vec{B}\vec{dS} = 0.$$

Это уравнение утверждает, что силовые линии магнитного поля замкнуты.

$$\text{V.}\quad \vec{J} = \sigma\vec{E}.$$

Это уравнение говорит, что плотность электрического тока в проводнике всегда пропорциональна напряженности электрического поля.

$$\text{VI.}\quad \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}.$$

$$\text{VII.}\quad \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}.$$

Два последних уравнения показывают связь между силовыми характеристиками электрического и магнитного полей с векторами электрического смещения и напряженности магнитного поля, с постоянными вакуума $\varepsilon_0$ и $\mu_0$, с относительной проницаемостью $\varepsilon$ и $\mu$ диэлектрической среды и магнитной среды.

Эти замечательные уравнения могут быть записаны и в дифференциальной форме, которая дает возможность выразить связь между электрическими и магнитными величинами в любой момент времени в какой-либо точке электромагнитного поля. Уравнения Максвелла —Герца позволяют решать самые разнообразные задачи в области электрических и магнитных явлений. В этом смысле они подобны законам Ньютона.

Учение о механических явлениях, построенное на законах Ньютона, называется классической механикой. Учение же об электрических и магнитных явлениях, построенное на уравнениях электромагнитного поля, называется классической электродинамикой.

## ЭЛЕКТРОНИКА

### Электронная природа тока в металле

Об элементарной частице — электроне — подробно рассказывается в статье «Элементарные частицы». Здесь же мы подчеркнем лишь то, что исследование свойств электрона позволило многое узнать о природе электромагнетизма. Именно его движение в проводнике и создает электрический ток.

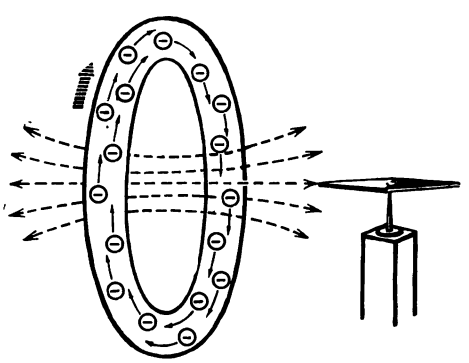


Рис. 24.

Первым эту мысль высказал голландский физик Гендрик Лоренц. Электронную природу тока в металлах доказывает, например, опыт, предложенный советскими академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси.

Если металлическое кольцо быстро и равномерно вращать, то вместе с ним начнут вращаться и свободные электроны атомов металла (рис. 24). Что же произойдет, если резко остановить кольцо? Свободные электроны по инерции будут продолжать движение, и в кольце пройдет ток. Он создаст магнитное поле, и его можно легко обнаружить магнитной стрелкой.

### Опыт Милликена

Электрическое поле действует на электрический заряд при любых обстоятельствах, движется он или покоится. Если он покоится, поле приведет его в движение, передав ему энергию.

Электрон обладает наименьшей долей электрического заряда. Какие бы тела мы ни зарядили и какой бы заряд им ни сообщили, заряд электрона будет общим наименьшим кратным всех электрических зарядов. Это экспериментально установили Фарадей—в явлении электролиза и Р. Милликен — в специальном опыте, подтвердившем атомистичность электрического заряда.

Опыт Милликена поразительно прост, а его результаты неопровержимы. Если электрически заряженная капля (например, масла) окажется в электрическом поле плоского конденсатора с горизонтальными пластинами, то ее движение будет обусловлено силой Ньютона, силой Архимеда, силой Стокса (сила вязкого трения, возникающая при движении капли масла в воздухе) и силой Кулона. Первые три силы для любой капли неизменны, а четвертую — силу Кулона — можно регулировать, изменяя напряженность электрического поля между пластинами. Этим и воспользовался Милликен.

Силы Архимеда, Стокса и Кулона направлены противоположно силе Ньютона. Если сумма трех первых сил будет равна четвертой, капля останавливается, конденсатор отключается от батареи, электрическое поле, а с ним и сила Кулона выбывают из игры. Тем самым нарушается равновесие. Капля начинает двигаться с возрастающей скоростью. Но по мере возрастания скорости, в той же пропорции, увеличивается и сила Стокса. Через некоторое время, когда сумма сил Архимеда и Стокса сравняется с силой Ньютона, капля начнет двигаться равномерно. Зафиксировав время и пройденное каплей расстояние, можно определить ее скорость. На основе этой величины находят радиус капли, что в свою очередь позволяет измерить ее заряд.

Тысячи капель, десятки тысяч числовых значений электрических зарядов, которыми были заряжены капли, заносились изо дня в день в таблицу наблюдений. И если справедливо, что существует наименьшее значение электрического заряда, то должно быть и наименьшее кратное всех зарядов капель. Это число было найдено:

$$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \text{ кулона},$$

## Сила Лоренца

Поместим проводник с током в магнитное поле. Он придет в движение. Силу, которая на него действует, определил Ампер:

$$F_A = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha.$$

Если же угол $\alpha$ между направлением поля и тока в проводнике прямой, то выражение получает такой вид:

$$F_A = B \cdot I \cdot l.$$

Но что же надо считать первопричиной движения проводника с током в магнитном поле? Из чего складывается сила Ампера? Поле перемещает проводник, если в нем течет ток, а ток — движение электронов. Очевидно, сумма сил, действующих на каждый из движущихся зарядов, и есть сила Ампера. Лоренц определил силу, действующую на каждый электрон. Для этого он разделил силу Ампера на число электронов в проводнике:

$$F_Л = \frac{F_A}{n} = \frac{B \cdot I \cdot l}{n}.$$

В этой формуле $B$ — индукция поля, $I$ — сила тока, $l$ — длина проводника и $n$ — число электронов. Сила тока определяется в объеме проводника зарядом $q$, проходящим через сечение проводника в единицу времени: $I = \frac{q}{t}$. Заряд $q$ определяется произведением числа электронов $n$ на заряд одного электрона $e$:

$$q = n \cdot e.$$

Если в формулу Ампера подставить значение $I$, то

$$F_A = B \frac{e \cdot n}{t} l = B \cdot e \cdot n \frac{l}{t} = B \cdot e \cdot n \cdot v,$$

где $v$ — скорость движения электрона в проводнике.

Теперь формулу Лоренца можно записать так:

$$F_Л = \frac{B \cdot e \cdot n \cdot v}{n} = B \cdot e \cdot v.$$

Сила Лоренца перпендикулярна как вектору скорости электрона $\vec{v}$, так и вектору индукции поля $\vec{B}$. Из механики известно: если на движущееся тело действует сила, перпендикулярная направлению его движения, то это центростремительная сила — тело будет двигаться по кругу. Учтя это, можно сказать, что заряженная частица, попадая в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно ее движению, будет двигаться под действием силы Лоренца по окружности.

Магнитное поле действует только на движущиеся заряды. Направление силы, действующей на заряд, всегда перпендикулярно его движению, а это значит, что она изменяет лишь направление движения, но не его скорость. Кинетическая энергия частицы остается без изменений.

Так как центростремительная сила—это сила Лоренца, т. е.

$$F_Л = \frac{m \cdot v^2}{R},$$

то, следовательно:

$$B \cdot e \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{R}.$$

Эта формула позволяет находить отношение заряда частицы к ее массе:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot R}.$$

Такое поведение движущегося заряда в магнитном поле дает возможность строить гигантские инструменты для проникновения в сокровенные тайны микромира — ускорители элементарных частиц. Электрическое поле ускоряет частицы, а магнитное поле возвращает их для повторения цикла.

## Электрический момент и поляризация диэлектрика

Два разноименных электрических заряда, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, называются электрическим диполем. Диполь характеризуют вектором электрического момента ($P_э$), который равен произведению одного заряда на расстояние между зарядами, т. е. $\vec{P}_э = \overrightarrow{q \cdot l}$. Вектор этот направлен от отрицательного заряда к положительному и в электрическом поле ориентируется (поворачивается) по направлению поля. Это явление называется поляризацией. Если поле

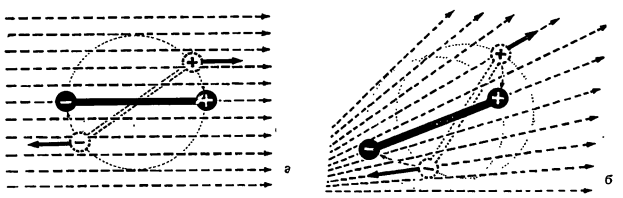


Рис. 25.

однородно, то его действие приводит диполь во вращение (рис. 25,*а*). Диполь в неоднородном поле не только поворачивается, но и смещается (рис. 25, *б*). Атомы и молекулы многих диэлектриков — диполи. Попадая в электрическое поле, они поляризуются. Однако поляризуются и те диэлектрики, атомы и молекулы которых недиполи, т. е. не обладают электрическим моментом: сначала силы поля разделяют заряды в атомах и молекулах этих веществ и превращают их в диполи, а затем диполи ориентируются в направлении поля.

### Магнитный момент и намагничивание магнетика

Согласно модели Резерфорда—Бора в ядре атома есть положительный заряд, а вокруг ядра движутся отрицательные заряды — электроны. При своем движении каждый из электронов образует электрический ток, вокруг которого создается магнитное поле. Круговой ток равноценен маленькому магниту, который характеризуется вектором магнитного момента $P_м$. Численно он равен произведению силы тока на площадь, обтекаемую им:

$$\vec{P_м} = \overrightarrow{I \cdot S}.$$

Вектор магнитного момента направлен перпендикулярно к плоскости вращения электрона. Каждый из электронов атома движется по своей орбите, орбиты же лежат в разных плоскостях. Если векторы магнитных моментов сложить, получится результирующий вектор — орбитальный магнитный момент атома.

Из механики известно, что вращающееся тело обладает моментом количества движения. Если на тело не действует момент внешней силы, то момент количества движения сохраняется. Отсюда ясно, что и атом благодаря движению электронов вокруг ядра имеет механический момент количества движения. А так как при этом образуются круговые токи, то существует и магнитный момент.

Существование магнитного момента доказывается опытом, который провели Эйнштейн и де-Гааз. Металлический цилиндр подвешен за ось так, что может вращаться. На цилиндр намотана проволока, концы которой соединены с электрическим генератором. Когда включают ток, цилиндр начинает вращаться. Это видно по движению светового пучка, который отражается зеркальцем, укрепленным на оси цилиндра. Какие же силы вращают цилиндр? При включении тока цилиндр намагничивается, т. е. магнитные моменты атомов ориентируются в металле по направлению магнитного поля, которое создается обмоткой. При этом у каждого атома вектор момента количества движения меняет направление, а значит, меняется и величина механического момента количества движения всех атомов. Согласно закону сохранения момента количества движения цилиндр не может оставаться в покое.

Опыт подтверждает, что в атомах существуют магнитные моменты, но результаты опытов не совпадают с теоретическими расчетами. Теоретически должны получаться меньшие величины. После тщательных поисков причину расхождения нашли. Электрон, двигаясь вокруг ядра, вращается, подобно Земле, и вокруг своей оси. Это вращение создает его **собственный магнитный момент — спин.** Таким образом, магнитный момент атома складывается как из орбитальных моментов его электронов, так и из их спинов.

Сумма векторов зависит от их направлений. Не исключено, что у атомов некоторых веществ, например у висмута, эта сумма равняется нулю. Вещество, у атомов которого магнитный момент равен нулю, называется диамагнетиком; если же магнитный момент у атомов отличается от нуля, вещество называется парамагнетиком.

Среди парамагнетиков выделяются ферромагнетики. В больших группах их атомов магнитные моменты даже в ненамагниченном состоянии вещества направлены в одну сторону (рис. 26, *а*). Намагничивание связано с ориентацией магнитных моментов вдоль поля. В обычном парамагнетике (рис. 26, *б*) каждый магнитный момент устанавливается самостоятельно, а в ферромагнетике ориентируется целыми областями.

Что же касается диамагнетиков (рис. 26, *в*), то под действием магнитного поля на движущиеся заряды (сила Лоренца) электроны их ве-

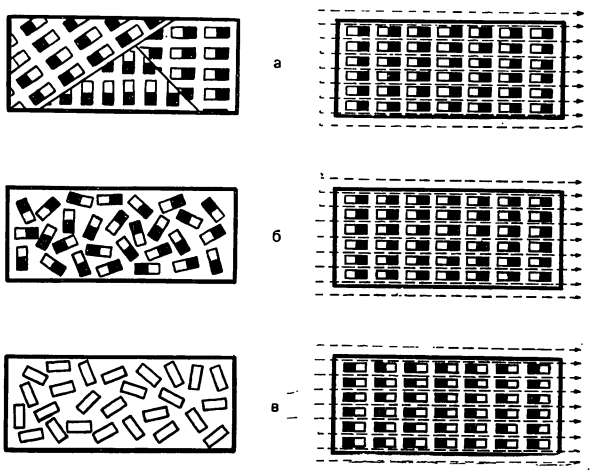



Рис. 26.

щества приобретают добавочное движение; в результате этого возникает магнитный момент, направленный против поля. Поле выталкивает диамагнетик, и он устанавливается, как доказал Фарадей, перпендикулярно полю.

## КВАНТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

### Фотоэффект

Накануне XX века теорию электромагнитного поля постигла неудача. Г. Герц открыл новое физическое явление — фотоэффект. Это явление подробно исследовал русский физик А. Г. Столетов.

Фотоэлектрические опыты Столетова удивили и озадачили весь ученый мир. Удивление было вызвано действием света, т. е. электромагнитных волн на заряженную отрицательным электричеством металлическую пластинку. Закономерности, обнаруженные при этом, противоречили уже известным свойствам электромагнитных волн. Поэтому объяснить фотоэффект казалось невозможным.

Если освещать отрицательно заряженную металлическую пластинку, она разрядится. Это означает, что «свободные» электроны покинули металл. Если вылетевшие электроны попадут в электрическое поле положительно заряженной пластинки, соединенной с пластинкой освещаемой, то в цепи потечет ток. Этот ток назвали фотоэлектрическим. Вызвать его можно не всяким освещением. При одном цвете света (т. е. при одной длине электромагнитной волны), как ни увеличивать его интенсивность, фотоэлектрического тока совсем нет. Зато при другом цвете по мере увеличения интенсивности света возрастает и ток. При этом обнаруживается зависимость фотоэффекта от металла пластинки. Каждому металлу соответствует определенная частота колебаний световой волны, при которой начинается эффект. Частоту эту назвали порогом фотоэффекта или «красной границей». Если частота электромагнитных колебаний света, которым освещают металл, больше порога, эффект наблюдается; если меньше, то, как ни увеличивать интенсивность света, эффект отсутствует.

Все это противоречило классическим представлениям о физических процессах. Если электрону нужна энергия, чтобы покинуть металл, то, казалось бы, чем выше интенсивность электромагнитной волны, тем больше она принесет энергии. А этого-то как раз и не видно у тех волн, частота которых меньше порога.

Объяснить порог фотоэффекта классическая электродинамика не смогла.

### Гипотеза Планка

Сюрприз преподнесло решение задачи о распределении энергии в спектре излучения абсолютно черного тела при заданной температуре. Задачу эту решали полвека, ею занималось целое поколение ученых. Но решить ее так, чтобы результаты измерения энергии на различных участках спектра совпали с формулой, не удавалось.

Различные тела поглощают электромагнитные волны по-разному. Физическое тело, поглотительная способность которого равна единице, т. е. тело, поглощающее все падающие на него лучи, называют абсолютно черным. Примером может служить зачерненная изнутри полость с небольшим отверстием. Сажа и черный бархат очень близки к абсолютно черному телу. Как это ни странно, всем требованиям, предъявляемым к абсолютно черному телу, отвечает Солнце — его поглотительная способность равна единице.

Ученые долго не могли решить задачу о распределении энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. По мнению немецкого физика Макса Планка, их неудачи были неизбежны, так как они считали, что электромагнитная энергия поглощается и излучается телом непрерывно. Планк же предположил, что атомы тела поглощают и излучают энергию определен-

ными порциями — к в а н т а м и. Величина кванта поглощенной и излучаемой энергии пропорциональна частоте соответствующей волны:

$$\varepsilon = h\nu.$$

Коэффициент пропорциональности ($h$) называют п о с т о я н н о й П л а н к а:

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ дж \cdot сек.$$

Теперь можно было и решить задачу. Формула Планка соответствовала результатам опыта. Вслед за этим решением возникла к в а н т о в а я теория; Эйнштейн дополнил теорию Планка, предположив, что распространение света происходит квантами. Это объяснило закономерности фотоэффекта, обнаруженные в опытах Столетова.

Рассматривая с квантовой точки зрения поглощение волны, падающей на поверхность заряженного металла, Эйнштейн выразил закон сохранения энергии в явлении фотоэффекта так:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A,$$

где $\frac{mv^2}{2}$ — кинетическая энергия электрона, вылетающего из металла, $A$ — работа, затрачиваемая на его вылет. Если электроны не вылетают из пластинки, это означает, что квант энергии меньше $A$. Увеличение интенсивности приводит лишь к увеличению числа квантов, а не энергии в каждом кванте. Согласно квантовой теории на пороге фотоэффекта частота световой волны — это та частота, при которой квант энергии равен работе, затраченной вылетающим электроном:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}.$$

Если же частота волны больше частоты порога, то кинетическая энергия вылетающего электрона будет равна разности между квантом энергии и работой вылета:

$$\frac{1}{2} mv^2 = h\nu - A.$$

Так возникло представление о новых квантовых свойствах электромагнитного поля и, естественно, его видимого спектра — света.

Следующим успехом квантовой теории было то, что она объяснила спектры излучения атомов. Возьмем, например, спектр водорода. В нем видны линии, отстоящие друг от друга и объединенные в группы — серии. Каждая линия указывает на электромагнитную волну определенной частоты. Значит, атом при излучении волны отдает строго определенную энергию. В этом, собственно, и состоит квантовый характер излучения. Он выражается правилом частот Бора:

$$h\nu = E_1 - E_2,$$

где $E_1$ — энергия атома до излучения кванта энергии, $E_2$ — энергия атома после излучения, а $\nu$ — частота волны.

Квантовая теория обогатилась, таким образом, новым физическим содержанием. Она открыла те возможные значения энергии, которыми обладает атом. Не любые значения энергии может иметь атом, а только, как принято говорить, к в а н т о в ы е, так как энергия атома изменяется скачком.

Эта особенность побудила искать другие квантовые свойства атомов. Физики обратились к магнитному моменту атома. Опыт был прост. Узкий пучок атомов пропустили через магнитное поле. Пройдя поле, пучок разделился надвое. Магнитные моменты, следовательно, ориентированы двумя способами и имеют определенную величину, т. е. тоже оказываются квантованными.

Таким образом, квантовый характер электромагнитного поля отражает квантовые свойства излучающих его источников — атомов и молекул. Видимый свет стало возможным объяснить при помощи фотона — частицы, энергия которой равна кванту:

$$\varepsilon = h\nu.$$

Так открылась двойственная природа света — волновая и корпускулярная. Каждое свойство объясняет определенный круг явлений. Они не исключают друг друга, а дополняют.

## Квантовая электроника

В 1917 г. Эйнштейн обнаружил одно интересное явление, но, как ни странно, не придал ему особого значения. Когда пучок света проходит через слой вещества, он частично поглощается этим слоем. Луч света — это поток фотонов, энергия каждого из них равна кванту $h\nu$. Проходя через вещество, фотон встречается с его атомами и может быть ими поглощен. Число фотонов луча уменьшится, и вышедший из слоя пучок будет менее интенсивным. Но что произойдет с атомом, поглотившим фотон? Энергия его вырастет; он перейдет, как говорят физики, на более высокий энергетический уровень. Но в таком возбужденном состоянии он будет находиться недолго, примерно $10^{-7}$ *сек*. Вернувшись в нормальное состояние, он отдаст полученную энергию — испустит фотон в лю-

бом направлении. На пути фотона встретится другой атом, с которым произойдет то же. Так поглощается свет веществом, атомы которого находятся в нормальном состоянии.

Иная картина наблюдается, когда атомы вещества возбуждены (именно это и отметил Эйнштейн). Фотон светового пучка, встречаясь с возбужденным атомом, не поглощается им. Более того, взаимодействуя с ним, он заставляет атом излучить фотон. Новый фотон неотличим от фотонов пучка ни энергией, ни направлением: он входит в общий поток, увеличивая в пучке число фотонов. Интенсивность светового луча, выходящего из вещества, становится больше интенсивности луча входящего. Атом же переходит в нормальное состояние. Излучение возбужденного атома под влиянием фотонов Эйнштейн назвал индуцированным.

Фотоны светового пучка, пропуская свет через активное вещество, будут взаимодействовать с возбужденными атомами и увеличивать количество себе подобных как по энергии кванта, так и по направлению распространения. По такому принципу действует квантовый усилитель. Возбуждение индуцированного излучения начинается в активном веществе квантового генератора «случайными фотонами», которые излучаются возбужденными атомами активного вещества при самостоятельном переходе в нормальное состояние. «Случайные фотоны», проходя через вещество, взаимодействуют с возбужденными атомами и порождают себе подобные фотоны. Количество фотонов индуцированного излучения начинает быстро увеличиваться.

Получать выходящий из вещества луч с более высокой интенсивностью можно, только возбуждая атомы вещества. Хотя поддерживать большое количество атомов в возбужденном состоянии нелегко, тем не менее такой эксперимент был осуществлен советскими учеными. В 1951 г. Комитет по делам изобретений зарегистрировал полностью разработанное открытие — усиление электромагнитных волн атомами среды, находящимися в возбужденном состоянии. Авторами открытия были В. А. Фабрикант, М. М. Вудынский и Ф. А. Бутаева. Через несколько лет в СССР и в других странах начали конструировать квантовые генераторы радиоволн — мазеры и видимого света — лазеры (подробнее о них написано в статьях «Свет» и «Радио»). Эти генераторы испускают очень плотный концентрированный пучок монохроматических электромагнитных колебаний высочайшей интенсивности. Они обещают произвести целый переворот в технике связи, в обработке металла и, быть может, в передаче энергии.

На основе квантовой теории возникли квантовая электроника и радиофизика — наиболее перспективные и заманчивые отрасли экспериментальной физики, которые ведут свое происхождение от первых опытов с электромагнитным полем.

■

# РАДИО

## ВЕЛИКИЙ ПОМОЩНИК ЧЕЛОВЕКА

«Говорит Москва!» И миллионы людей во всех концах нашей страны, во всех уголках планеты слышат голос человека, говорящего в Москве.

Москва слышит голоса моряков, ушедших в далекое плавание, зимовщиков, исследующих Южный континент и Северный полюс... В далекой Якутии молодой врач должен делать сложную операцию; он не может ждать и не имеет права ошибиться, и ему помогает советом опытный коллега, находящийся за несколько тысяч километров...

Весь мир слышал голос первого космонавта Юрия Гагарина: «Полет проходит нормально!»

Все это — радио, великое чудо, созданное руками и гением человека. Это воплощенная мечта человечества, веками стремившегося говорить, слышать и видеть на расстоянии.

«Там-там-там...» — рокотали барабаны в джунглях. Это первобытное «радио» Африки несло важную весть от селения к селению.

На деревянных вышках в заокской степи один за другим вспыхивали костры. Их зажигали дозоры, предупреждающие о приближении воинственных кочевников. Костер на последней вышке видел дозорный Кремля, и вот уже над столицей гудел тревожный набат, созывая москвичей на защиту родного города...

Прошли века, и теперь важные для народа вести передает радио, спасает жизнь тысячам

людей, предупреждая их о непогоде, о штормах и буранах. При землетрясении у берегов Южной Америки рождается гигантская волна цунами, почти со скоростью звука двигающаяся на острова и Азиатский материк. Только радиоволны могут обогнать ее и вовремя предупредить людей об опасности.

Радио со спутников и космических станций сообщает нам важные данные о космосе: радиосигналы доносят до нас «голоса» Вселенной и расшифровывают тайны мироздания.

Изобретение радио решило сразу две проблемы — максимальную быстроту сообщений (300 000 *км/сек*) на любое расстояние и их передачу большому количеству людей. Ни у одного вида связи не было и нет такой громадной аудитории.

Радио — величайший триумф науки и техники. И радио — важнейшее средство научно-технического прогресса. Успехи в освоении космоса, в познании Вселенной, в раскрытии тайн микромира, в автоматизации были бы невозможны без радио и радиоэлектроники.

## ПЕРВАЯ РАДИОГРАММА

Основы радио заложены величайшими открытиями науки XIX в. Первые из этих открытий сделал знаменитый английский физик Майкл Фарадей. Он положил начало представлению об электрическом и магнитном полях. Фарадей пришел к выводу, что электрическое и магнитное поля возникают в пространстве и распространяются на бесконечные расстояния с громадной скоростью. Соотечественник Фарадея— Джемс Максвелл развил его учение и создал теорию электромагнитного поля. Максвелл доказал, что любое изменение электрического поля влечет за собой изменение магнитного поля. Если по проводнику течет переменный электрический ток, вокруг него возникает электромагнитное поле и распространяется в пространство со скоростью света. Максвелл первым предположил, что и свет — это электромагнитное излучение.

В 1886—1889 гг. немецкий физик Генрих Герц открыл способ получать и обнаруживать электромагнитные волны. Он экспериментально доказал, что они распространяются со скоростью света, отражаются от металлических поверхностей, преломляются призмой из парафина и т. п.

Герц получал электромагнитные волны при помощи катушки Румкорфа в искровом промежутке между двумя шариками. Большое вогнутое металлическое зеркало, подобно прожектору, отражало эти волны пучком ко второму такому же устройству, служившему приемной антенной.

Когда в первом разряднике проскакивала искра, во втором появлялись маленькие искорки: электромагнитное излучение вызывало в приемном резонаторе появление высокочастотного электрического тока. (Подробнее о работах Фарадея, Максвелла и Герца см. в ст. «Электромагнитное поле»).

Герц не оценил значение сделанного им открытия. Он заявил, что не видит для него практического применения. Но всего через 10 лет это, казалось бы, не подающее надежд дитя, подобно андерсеновскому гадкому утенку, заставило говорить о себе весь мир. А еще через 20 лет оно само разносило голоса людей по всей планете. Изобретатель радио А. С. Попов доказал, что электромагнитные волны могут быть применены для передачи сигналов через пространство.

В опытах Герца, которому удавалось обнаруживать электромагнитные волны всего в 2—3 *м* от их источника, Попов увидел принципиальную возможность принимать их на любом расстоянии.

В своем первом радиоприемнике Попов использовал в качестве обнаружителя электромагнитных волн когерер, изобретенный незадолго до этого (рис. 1). К о г е р е р — это стеклянная трубка, наполненная металлическими опилками. При прохождении электромагнитных волн опилки слипаются друг с другом, и их сопротивление электрическому току резко падает. В приемнике Попова ток, начинавший течь при прохождении электромагнитных волн через когерер, включал электрический звонок. После приема сигнала молоточек электрического звонка встряхивал когерер, восстанавливая его высокое сопротивление.

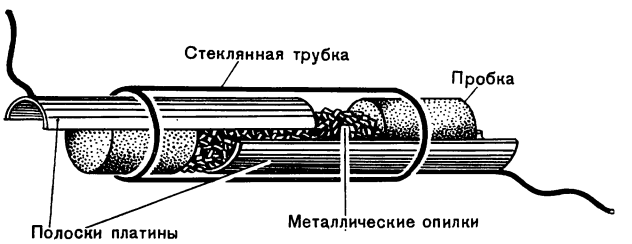



**Рис. 1. Когерер в грозоотметчике А. С. Попова. На рисунке для наглядности полоски платины раздвинуты.**

В 1896 г. Попов продемонстрировал свой радиотелеграф (рис. 2), передав без проводов первую в мире радиограмму: «Генрих Герц». Передатчиком был вибратор Герца, который приводился в действие телеграфным ключом; в приемнике когерер включал телеграфный аппарат, который записывал сигналы азбуки Морзе на ленту. Дальнейшее усовершенствование радиотелеграфа позволило Попову осуществить связь между кораблями в море. В 1901 г. Попов организовал радиосвязь потерпевшего аварию броненосца «Генерал-адмирал Апраксин» с Кронштадтом, и одна из первых радиограмм спасла жизнь рыбакам, унесенным в море на льдине, сообщив о бедствии с корабля на берег.

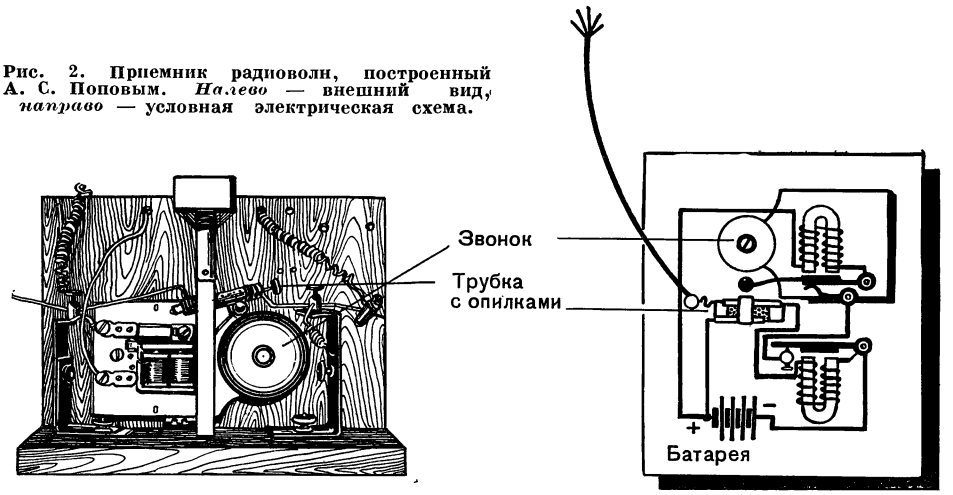



Рис. 2. Приемник радиоволн, построенный А. С. Поповым. *Налево* — внешний вид, *направо* — условная электрическая схема.

Значительную роль в развитии радио сыграл итальянец Маркони. Он разработал новые конструкции передатчиков и приемников и в 1921 г. впервые осуществил регулярную радиосвязь между Европой и Америкой.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Радиоволны, как и свет, —это электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве со скоростью 300 000 *км/сек*. Они переносят через пространство энергию, излучаемую генератором электромагнитных колебаний. А рождаются они при изменении электрического поля, например, когда через проводник проходит переменный электрический ток или когда через пространство проскакивают искры, т. е. ряд быстро следующих друг за другом импульсов тока.

Электромагнитное поле возникает при электрических колебаниях в контуре, т. е. в замкнутой цепи, содержащей **конденсатор** и **катушку индуктивности**. При каждом изменении направления электрического тока в контуре вокруг него возникает изменяющееся магнитное поле, а оно, согласно теории Максвелла, обязательно рождает и электрическое поле. Замкнутые силовые линии полей как бы отрываются от пластин конденсатора и отправляются путешествовать в пространство.

Электромагнитное излучение характеризуется частотой, длиной волны и мощностью переносимой им энергии. Частота электромагнитных волн показывает, сколько раз в секунду изменяется в излучателе направление электрического тока, а следовательно, сколько раз в секунду изменяется в каждой точке пространства величина электрического и магнитного полей. Измеряется частота **в герцах**. Один герц (*гц*)— это одно колебание в секунду; мегагерц (*Мгц*)— миллион раз в секунду. Зная, что скорость движения электромагнитных волн равна скорости света, можно определить расстояние между точками пространства, где электрическое (или магнитное) поле находится в одинаковой фазе. Это расстояние называется длиной волны. Частоте в 1 *Мгц* соответствует длина волны 300 *м*. Световым колебаниям соответствуют длины волн от 0,4 до 0,8 *мк*.

Электромагнитные волны свободно проходят через воздух и космическое пространство. Но если им встретится металлический провод — антенна — или любое проводящее тело, они отдают ему свою энергию, вызывая в этом проводнике переменный электрический ток той же частоты. Однако часть электромагнитных волн отражается от поверхности проводников. На этом основано их использование в радиолокации.

Замечательная особенность электромагнитных волн, как и всяких волн,— это их способность огибать тела на своем пути. Но это возможно лишь в том случае, когда размеры тела меньше, чем длина волны, или сравнимы с ней. Если же тело больше, чем длина волны, оно

может отразить ее. Например, чтобы обнаружить самолет, длина радиоволны локатора должна быть меньше 10 *м*.

Энергия, которую приносят электромагнитные волны, зависит от мощности генератора (излучателя) и от расстояния до него. Поток энергии, проходящей через единицу площади, прямо пропорционален мощности передатчика и обратно пропорционален квадрату расстояния до него. Для примера укажем, что поток энергии электромагнитного излучения Солнца на поверхности Земли достигает 1 *квт/м*$^2$, а потоки энергии широковещательных радиостанций — всего тысячные и миллионные доли ватта на 1 *м*$^2$.

Радиоволны, т. е. электромагнитные волны, используемые сейчас в радиотехнике, занимают область, или, как говорят ученые и инженеры, спектр, электромагнитных волн длиной от 10 тыс. *м* (30 *кгц*) до 1 *мм* (300 тыс. *Мгц*).

Это только часть обширного спектра электромагнитных волн (см. цвет. табл. у стр. 193). Свет и радиоволны, тепловые и рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи и грозные гамма-лучи — у всех у них одна и та же природа. Это электромагнитные колебания, различающиеся только длиной волны.

За радиоволнами (по убывающей длине волны) следуют тепловые, или инфракрасные, лучи. После них идет узкий участок волн видимого света, а за ним размещается спектр ультрафиолетовых лучей, на которые наш глаз уже не реагирует. Их можно обнаружить с помощью фотопластинки. За ультрафиолетовыми следуют рентгеновские лучи. Они обладают свойством проникать сквозь такие тела и предметы, которые совершенно непроницаемы для лучей видимого света. Они проходят сквозь ткани человеческого тела, дерево и даже металлы. Еще дальше лежит область гамма-лучей; их испускают при распаде ядра атомов радиоактивных веществ.

Границы между областями спектра намечены условно. Эти области следуют непрерывно одна за другой, переходят одна в другую, а в некоторых случаях даже перекрывают друг друга.

Общепринято делить спектр радиоволн, применяемых в радиовещании, на четыре области:

| Волны | Частота | Длина волны |
|---|---|---|
| Длинные — | от 0,1 до 0,4 *Мгц* | от 3000 до 700 *м* |
| Средние — | от 0,5 до 1,5 *Мгц* | от 600 до 200 *м* |
| Короткие — | от 3 до 25 *Мгц* | от 100 до 11 *м* |
| Ультракороткие — | до 100 *Мгц* | от 10 до 1 *м* |

Кроме метровых волн, диапазон ультракоротких волн (УКВ) включает также дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны. Для радиовещания отведены участки:

| | |
|---|---|
| Длинные волны— | 2000—750 *м*. |
| Средние волны — | 600—180 *м*. |
| Короткие волны — | 80— 10 *м*. |
| Ультракороткие волны — | 10— 5 *м*. |

Это так называемые вещательные диапазоны. Другие участки радиоспектра предназначены для радиотелефонной связи, для радиосвязи с самолетами, радиомаячной, морской и других специальных радиослужб.

На волне 600 *м* передается знаменитый сигнал «SOS» — сигнал бедствия. На этой волне работают только аварийные передатчики.

Короткие волны служат для дальних связей. На метровых волнах ведут телевизионные передачи. Дециметровые и сантиметровые волны используют радиолокация, радионавигация, радиогеодезия. Миллиметровые волны в последнее время все шире применяются в радиолокации. Используются они и в специальных, физических исследованиях.

## КАК РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ РАДИОВОЛНЫ

Радиоволны могут излучаться через антенну в пространство и распространяться без проводов в виде энергии электромагнитного поля. Однако волны различной длины распространяются не одинаково и требуют антенн различных размеров.

Земля представляет собой проводник электричества, хотя и не очень хороший. Радиоволны, проходя над Землей, возбуждают в ней электротоки. На создание этих токов тратится часть энергии, и радиоволны постепенно ослабевают; чем волна короче, тем больше она поглощается Землей.

Радиоволна ослабевает еще и потому, что энергия, излученная передатчиком, расходится во все стороны пространства, и, чем дальше от передатчика, тем меньше приходится энергии на такую же площадь, тем меньше энергии может принять одна антенна.

Передачи длинноволновых станций можно принимать на расстояниях до нескольких тысяч километров, причем громкость приема уменьшается плавно, без скачков (рис. 3). Средние волны распространяются в пределах тысячи километров. Ночью слышимость средневолновых станций резко возрастает. Что же

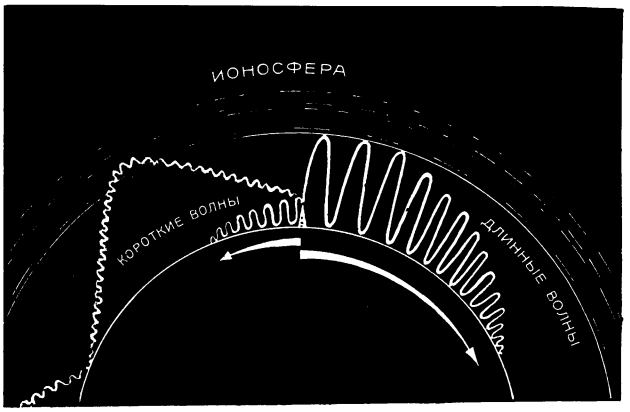



**Рис. 3. Распространение радиоволн в тропосфере.**

касается коротких волн, то энергия их резко убывает по мере удаления от передатчика.

Не удивительно поэтому, что в первые годы развития радиотехники для дальней связи применяли волны длиной от 1 до 30 *км*. Волны короче 100 *м* считались непригодными для дальней связи и их отвели радиолюбителям.

Однако, после того как ученые глубже исследовали свойства коротких и ультракоротких волн, оказалось, что они быстро затухают, лишь когда идут у поверхности Земли. Распространяясь вверх под большим углом к горизонту, короткие волны не уходят в пространство, а возвращаются обратно. Объясняется это свойствами атмосферы. Она состоит из тропосферы, стратосферы и ионосферы. Верхний слой — ионосфера — отражает короткие волны и помогает нам использовать их для дальней радиосвязи.

Это свойство ионосферы было обнаружено почти случайно. В 1921 г. один французский радиолюбитель принял на волне 20 *м* передачу маломощной американской радиостанции. Так, между Европой и Америкой был переброшен первый коротковолновый «радиомост». А меньше чем через год уже была установлена двухсторонняя радиосвязь через Атлантический океан.

Секрет дальнодействия коротких волн заинтересовал физиков. Еще в 1902 г. американский ученый Кеннеди и английский ученый Хевисайд высказали предположение, что на большой высоте должен быть слой воздуха, отражающий радиоволны. Сверхдальняя любительская радиосвязь подтвердила эту догадку, а современная наука точно установила наличие ионизированных слоев воздуха, отражающих радиоволны.

Процесс распространения коротких волн протекает так. Отразившись от ионосферы, они возвращаются к Земле далеко от источника, оставив под собой сотни километров «мертвой зоны» (рис. 4). Но, пропутешествовав к ионо-

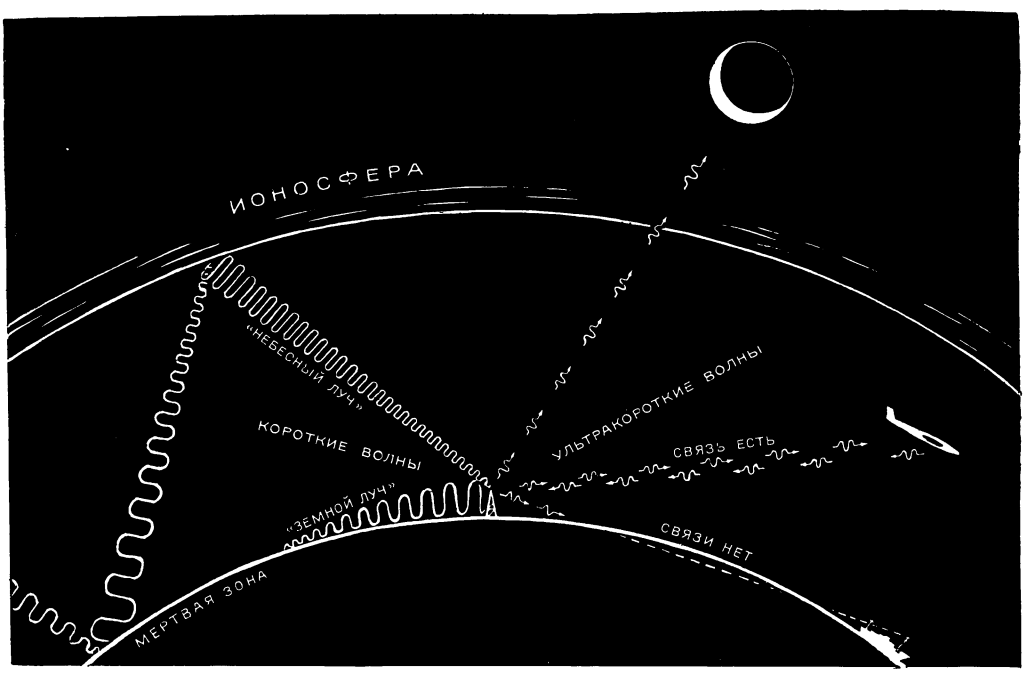



**Рис. 4. Распространение коротких и ультракоротких радиоволн. В местах падения луча на Землю — зоны слышимости, между ними — «мертвые» зоны.**

сфере и обратно, волна не успокаивается. Коснувшись Земли, она отражается от ее поверхности и вновь устремляется к ионосфере, снова отражается и т. д. Так, многократно отражаясь от ионосферы и земли, она может несколько раз обогнуть земной шар.

Установлено, что угол отражения зависит в первую очередь от длины волны. Чем короче волна, тем дальше от источника посылает ее ионосфера. Но эта зависимость верна лишь для волн длиною до 8—15 *м*. Более короткие волны ионосфера не отражает: они пронизывают ее насквозь и безвозвратно уходят в космическое пространство.

Эти ультракороткие волны ближе всех других радиоволн стоят к световым лучам и кое в чем напоминают их. Они почти не огибают земную поверхность и распространяются прямолинейно, в пределах прямой видимости. Поэтому дальность действия ультракоротких волн невелика. Но у них есть и преимущества для радиосвязи.

Поскольку они распространяются в пределах прямой видимости, радиостанции, работающие на УКВ, можно строить в 150—300 *км* друг от друга — взаимного влияния между ними не будет. Иными словами, одна и та же частота может быть многократно использована для радиопередач с соседних станций.

Но не только это позволяет работать на ультракоротковолновом диапазоне очень многим станциям. Волны длиной от 10 до 5 *м* охватывают полосу частот от 30 до 60 *Мгц*, т. е. полосу в 30 *Мгц*. Длинные и средние волны — от 2000 до 200 *м* — соответствуют частотам от 0,15 до 1,5 *Мгц*, т. е. занимают полосу частот всего в 1,35 *Мгц*. Во всем диапазоне УКВ можно расположить в 1000 раз больше радиостанций, чем в диапазонах длинных, средних и коротких волн, вместе взятых.

Ультракороткие волны близки к световым лучам и потому обладают еще одним интересным и важным свойством. Вспомним, как устроен прожектор. Свет от лампочки, расположенной в фокусе рефлектора, собирается в узкий пучок лучей, который можно послать в любом направлении. Примерно то же самое можно проделать и с радиоволнами УКВ-диапазона. Можно их собирать зеркалами-антеннами и посылать узкими пучками. Для длинных волн такую антенну построить невозможно, так как слишком велики были бы ее размеры: диаметр зеркала должен быть намного больше, чем длина волны. Эта особенность УКВ позволила использовать их в первую очередь для радиолокации, радиорелейной связи, телевидения— везде, где нужно направленное излучение.

И еще одно свойство выгодно отличает УКВ—малые помехи в радиоприеме. Этим свойством, в частности, объясняется, что в последние годы даже дешевые приемники снабжаются наряду с обычными диапазонами одним или несколькими ультракоротковолновыми.

Самые короткие волны радиоспектра — миллиметровые — распространяются так же, как и УКВ, но сильно поглощаются атмосферой. Для волн короче 1 *см* туман, дождь, облака — уже серьезные помехи, сильно ограничивающие дальность распространения.

Таким образом, волны радиодиапазона обладают различными свойствами распространения, и каждый участок этого диапазона применяется там, где лучше всего могут быть использованы его особенности.

## СХЕМА РАДИОСВЯЗИ

Схема радиосвязи очень проста (рис. 5): электрические колебания в антенне радиопередатчика вызывают электромагнитные колебания — радиоволны, распространяющиеся в пространстве. Достигнув антенны приемника, они наводят в ней переменный электрический ток. В первом приемнике Попова мощности передатчика хватало на то, чтобы когерер обнаруживал электромагнитное поле на расстоянии до 40 *км*. Для бо́льших расстояний нужно было бы увеличить мощность передатчика. Но увеличение мощности передатчиков имеет экономические и технические пределы, поэтому радиотехника стремилась увеличить чувствительность приемников. В них стали применять у с и л и т е л ь электрических колебаний тока, вызванного в антенне.

Замечательным свойством радиоволн оказалась возможность их модуляции, т. е. передачи с их помощью звуковых частот (см. стр. 233). Конечно, принципиально можно передавать электромагнитные колебания, соответствующие звуковым частотам, но их излучение и прием связаны с большими техническими трудностями.

## КАК НАСТРАИВАЮТСЯ НА ВОЛНУ

Для того чтобы множество станций могло вести передачи, не мешая друг другу, каждой из них выделена строго определенная частота или длина волны. А чтобы принять одну из этих

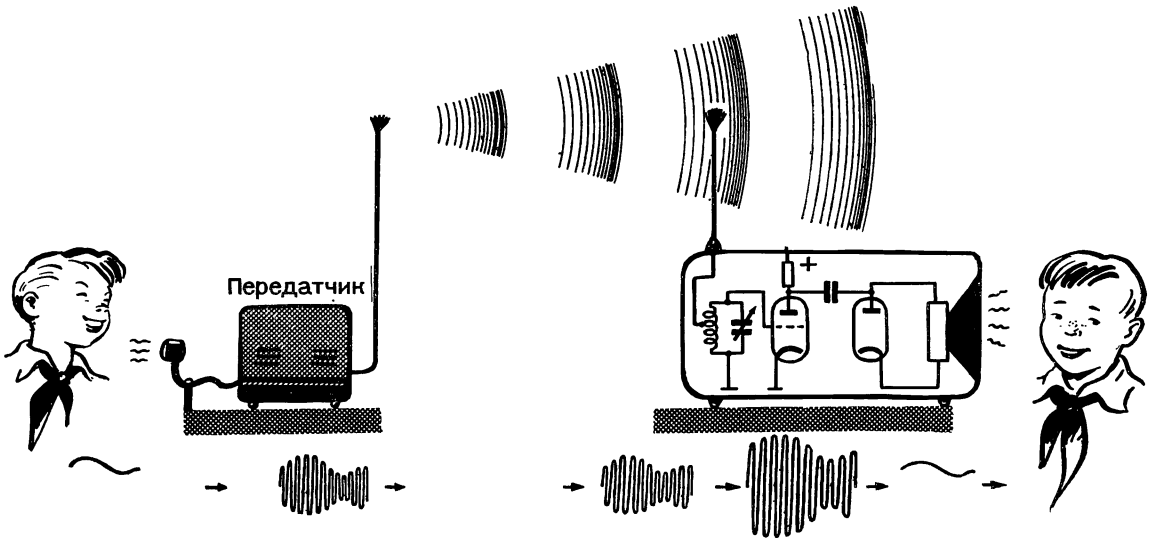



**Рис. 5. Приемник прямого усиления. Радиоволны идут от антенны передатчика к антенне приемника, затем через колебательный контур — к усилительной лампе, детектируются диодом и подводятся к динамику громкоговорителя.**

передач, в приемнике есть специальное устройство — колебательный контур (рис. 6). Он представляет собой замкнутую цепь, состоящую из катушки индуктивности и конденсатора. Катушка (ее иногда называют индуктивностью) — это свитый в спираль провод, а конденсатор — близко расположенные металлические пластины, на которых можно собирать заряды и накапливать, таким образом, электрическую энергию.

Если присоединить батарею к пластинкам конденсатора, на нем появятся электрические заряды. Пластина, соединенная с отрицательным полюсом, зарядится отрицательно, а соединенная с положительным — положительно. На пластинах появится электрическое напряжение, которое будет возрастать, пока не сравняется с напряжением батареи. Тогда конденсатор окажется заряженным до предела, соответствующего его электрической емкости, т. е. способности запасать электрические заряды. Чем больше емкость конденсатора, тем больше зарядов «войдет» в него при данном напряжении, тем больше электрической энергии сосредоточится в электрическом поле между пластинами.

Запасенная энергия останется в конденсаторе и после отключения батареи. Если заряженный конденсатор присоединить к катушке индуктивности, запасенная энергия вызовет протекание электрического тока через катушку: по ней потечет разрядный ток конденсатора.

Вокруг всякого проводника с электрическим током возникает магнитное поле. Появляется оно и вокруг катушки. Электрическая энергия конденсатора превращается в катушке в магнитную энергию электрического тока. В тот момент, когда конденсатор разрядится, магнитное поле достигает наибольшего значения и начинает убывать, пронизывая витки катушки.

Энергия, запасенная магнитным полем, разумеется, не может исчезнуть бесследно, она должна перейти в другой вид энергии. Согласно закону магнитной индукции, уменьшающееся

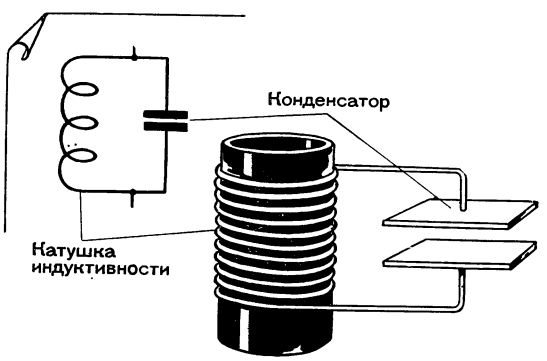



**Рис. 6 Колебательный контур и его условное обозначение на радиосхемах.**

магнитное поле катушки создает в ней электродвижущую силу, которая препятствует исчезновению поля. Эта сила создает ток, который начинает снова заряжать конденсатор. Но этот з а р я д н ы й  т о к будет течь уже в обратную сторону. Конденсатор вновь зарядится, но его пластины как бы поменяются местами: положительная зарядится отрицательно, отрицательная— положительно. Зарядившийся конденсатор снова начнет разряжаться через катушку. Однако разрядный ток в цепи потечет уже в другом направлении. Вокруг катушки появится магнитное поле, и процесс повторится в той же последовательности.

Электрическая цепь, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора, называется **замкнутым колебательным контуром**. В нем происходит периодическое перемещение электрических зарядов (т. е. движение тока) в противоположных направлениях. Конечно, со временем колебания тока в контуре прекратятся подобно тому, как постепенно затухают колебания маятника. Ведь провода, из которых сделан контур, обладают электрическим сопротивлением. Часть энергии при каждом колебании затрачивается, чтобы преодолеть это сопротивление, и превращается в тепло. Это основная причина энергетических потерь в контуре.

От чего же зависит ч а с т о т а электрических колебаний в контуре? Период колебания маятника, например, связан с его длиной. Чем больше длина, тем больше период, тем медленнее качается маятник. В часах ходиках, например, период равен 0,5 секунды, а самый большой маятник, подвешенный под 100-метровым куполом Исаакиевского собора в Ленинграде, совершает полное колебание за 20 секунд.

В электрическом контуре частота колебаний определяется величиной емкости конденсатора и индуктивности катушки. Чем больше число витков в катушке, тем меньше при данном диаметре ее индуктивность, тем быстрее изменяется сила тока в контуре. Чем меньше емкость конденсатора (рис. 7), тем меньше времени нужно на его разрядку и зарядку. Меняя величину емкости или индуктивности, легко настроить контур на любую частоту.

Колебания в электрическом контуре могут совершаться неизмеримо быстрее, чем качается самый короткий маятник. Перезарядка конденсатора с малой емкостью происходит за тысячные и миллионные доли секунды. Это значит, что частота колебаний в контуре—тысячи и миллионы раз в секунду, т. е. тысячи и миллионы герц.

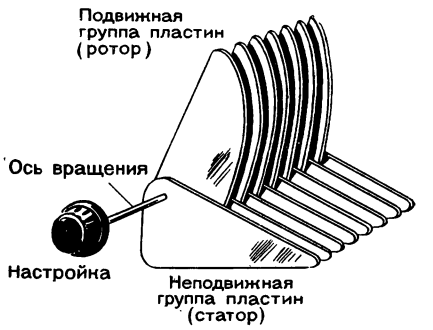



**Рис. 7. Конденсатор с переменной емкостью.**

В электрический контур можно вводить энергию извне. Для этого нужно воздействовать на контур внешней периодической силой, т. е. переменной электродвижущей силой какой-то определенной частоты. Такие колебания, вызванные действием внешней силы, называются в ы н у ж д е н н ы м и  колебаниями.

Если частота вводимой в контур электродвижущей силы совпадает с частотой колебаний контура, возникает явление р е з о н а н с а— амплитуда колебаний достигает наибольшей величины. При этом не надо увеличивать амплитуду подводимого колебания; нужно только, чтобы частота подводимых колебаний равнялась собственной частоте контура. Именно это явление и позволяет настраивать приемник на определенную волну и выделять нужную станцию среди огромного количества других.

Попробуем пояснить физическую сущность этого явления сначала на примере маятника. Чтобы маятник не останавливался, нужно подталкивать его в такт его собственным колебаниям. Даже если каждый толчок очень слаб, он передаст маятнику небольшую порцию энергии, но постепенно маятник можно раскачать очень сильно.

Так же можно «раскачать» и электрический контур, если подавать в него энергию в такт его собственным колебаниям. Из электрических колебаний различных частот контур выделит только нужную, свою частоту (рис. 8), так как лишь она вызовет явление резонанса. Из слабых «подталкиваний» контур постепенно соберет, накопит значительную энергию. Контур не сможет, конечно, собирать «толчки» и увеличивать амплитуду колебаний беспредельно. Чем больше амплитуда напряжения на контуре, тем больше амплитуда тока, тем больше потери, тем больше энергии рассеивается в виде тепла.

Каждый контур способен усиливать не одну частоту, а целую полосу частот, но чем выше его качество, или, как говорят, добротность, тем у́же эта полоса. Если в паспорте приемника записано, что полоса пропускания 6 *кгц*, а мы настроились на волну 1500 *м* (200 *кгц*), то приемник примет все частоты от 197 до 203 *кгц*. Расстояние между вещательными станциями, как правило, 9—10 *кгц*. Поэтому, принимая полосу в 6 *кгц*, мы все же слышим лишь одну передачу. Правда, случается, что в приемнике слышны сразу две передачи. Это значит, что контур приемника плохо разделяет частоты, что у него недостаточная избирательность.

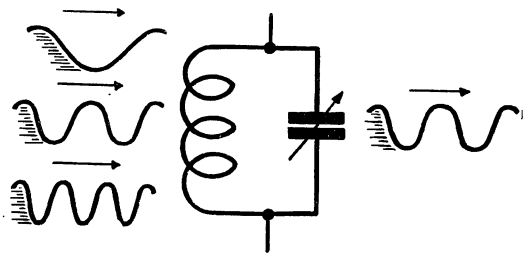


**Рис. 8. Колебательный контур «пропускает через себя» волны той частоты, на которую он настроен.**

## АНТЕННА И ПРИЕМНИК

Сигналы — электромагнитные волны — улавливает а н т е н н а. Чаще всего она состоит из куска провода. Принципиально это тоже колебательный контур, но резонансные свойства его выражены слабо, добротность низка. Через этот контур пройдут, не ослабляясь, сигналы всех радиовещательных станций.

Высокочастотное поле радиосигнала наводит в антенне токи высокой частоты, отсюда они поступают на входной контур. Этот контур выделит из хаоса частот узкую полосу, на которую он настроен.

Энергия сигналов, выделенных входным контуром приемника, а следовательно, и напряжение, возникающее на нем, весьма малы. Их недостаточно, чтобы привести в действие громкоговоритель. Только очень близкие и мощные радиостанции вызовут в приемном контуре достаточно сильные электрические колебания.

Чтобы преобразовать колебания принятого сигнала в электрические колебания звуковой частоты, которые приведут в действие громкоговоритель, их необходимо усилить (часто в тысячи и миллионы раз), а затем выделить из высокочастотных колебаний ту звуковую частоту, которую радиоволны принесли «на себе».

## КАК УСИЛИТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Мощность, потребляемая громкоговорителем радиоприемника или кинескопом телевизора, достигает 10—30 *вт*. Такую мощность сигнал радиостанции доставить не может. Дополнительная энергия доставляется по электрической сети или от батарей, которыми питается приемник. Слабые электрические колебания во входном контуре управляют выключением батареи. Одним словом, усилить электрические колебания — это значит использовать их энергию для включения и выключения источников питания. Хотя энергия колебаний и очень мала, она достаточна, чтобы привести в действие переключатель.

В жизни мы сплошь да рядом встречаемся с подобными явлениями. У автомобиля мощный двигатель, он может везти десятки тонн груза. Шофер управляет двигателем автомобиля, включая сцепление. По сравнению с силой двигателя сила шофера мала, но ее достаточно, чтобы «включить» могучую машину. Электрические колебания входного контура, управляющие включением батареи, играют роль шофера.

Входной контур управляет включением батареи, включая ее столько раз в секунду, сколько совершается колебаний в нем самом. Иными словами, в цепи управляемого источника тока создаются электрические колебания, частота которых та же, что и у управляющих колебаний, а мощность гораздо больше. Такое использование слабых электрических колебаний и называется у с и л е н и е м.

## СРЕДСТВО УСИЛЕНИЯ — РАДИОЛАМПЫ

В современных приемниках роль усилителя играют радиолампы. Но так было не всегда. Для приема близких и мощных радиостанций можно построить приемник и без усилительных ламп. Если во входном контуре развиваются достаточно мощные электрические колебания, то, выпрямив этот высокочастотный переменный ток и включив в его цепь телефон, можно услышать радиопередачу. Так и

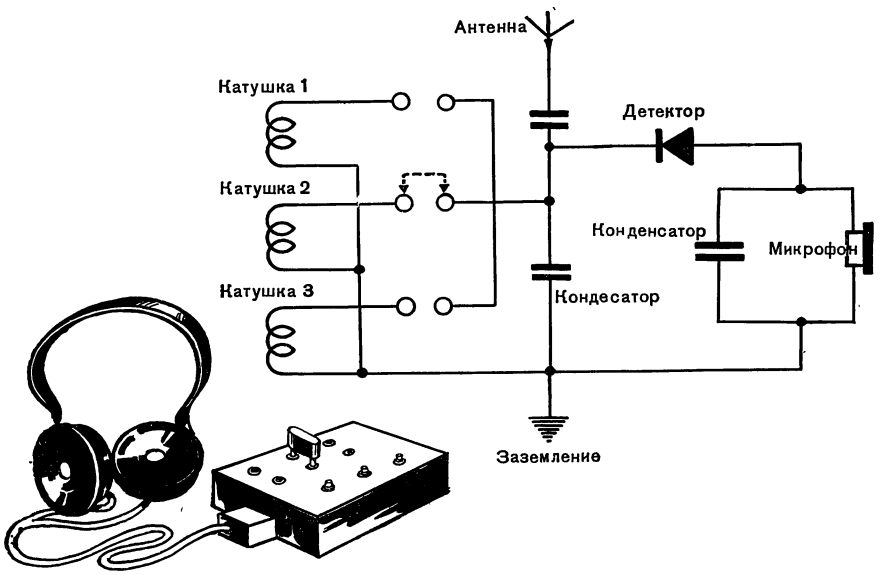



Рис. 9. Схема и внешний вид детекторного радиоприемника на три программы.

работали первые приемники (рис. 9). Электрические колебания контура пропускались через **детектор** — кристалл сернистого свинца — галенита. Этот кристалл выпрямляет переменный электрический ток.

Детектор был очень капризен. Чтобы он начал работать, нужно было тонкой, заостренной на конце проволочкой найти на кристалле точку, в которой он обладает наибольшей чувствительностью. Точку приходилось каждый раз искать заново.

В 1883 г. знаменитый американский изобретатель Томас Альва Эдисон экспериментировал с пустотной лампой накаливания — прообразом обычной электрической лампочки. В то время такие лампы еще не наполнялись инертным газом. Чтобы предотвратить перегорание нити накала, из них откачивали воздух до возможно большой степени разряжения.

В одном из опытов в стеклянный баллон лампы была впаяна, кроме нити накала, металлическая пластинка (рис. 10). Совершенно случайно подключив положительный полюс батареи к пластинке, а отрицательный — к нити накала, Эдисон заметил, что через пространство между нитью и пластинкой течет электрический ток. Неожиданное открытие взволновало и заинтересовало Эдисона, но объяснить его физическую сущность и применить на практике он так и не смог.

Почему ток при этих условиях течет через безвоздушное пространство? Вещество, как вы знаете, состоит из атомов. В центре каждого атома расположено ядро. Его окружает одна или несколько электронных оболочек. Ядро заряжено положительно, а каждый электрон несет отрицательный заряд. В целом атом нейтрален, так как отрицательный заряд всех электронов равен положительному заряду ядра. Но электроны не связаны с атомом неразрывно — при известных обстоятельствах они могут его покидать. Тогда в потерявшем электрон атоме появится избыток положительного заряда.

Особенно легко расстаются с электронами атомы металлов. Остов их кристаллической решетки состоит из ионов, между ними беспорядочно движутся свободные электроны. Чтобы свободный электрон мог «выскочить» из металла, он должен преодолеть притяжение положительно заряженных ядер или ионов, составляющих кристаллическую решетку. Металл, из которого вылетел хоть один электрон, становится положительно заряженным и начинает притягивать электрон обратно. Чтобы преодолеть это притяжение, свободный электрон должен обладать достаточной энергией. Такую

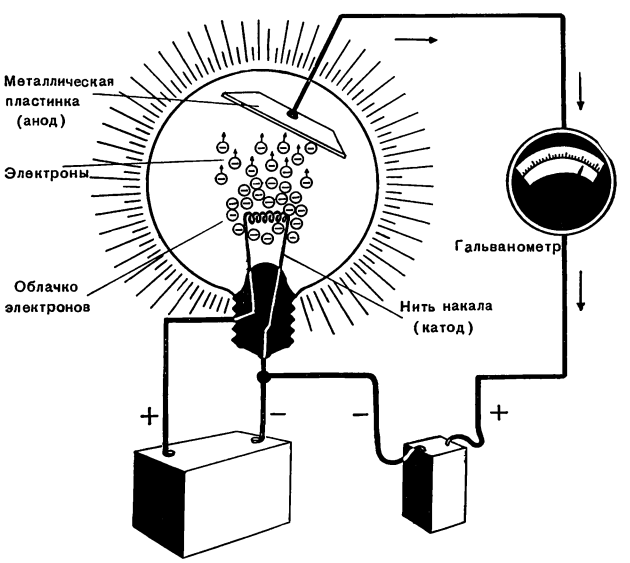



Рис. 10. Схема эдисоновского опыта с пустотелой лампой накаливания.

энергию он получает, например, когда проводник нагревается. При нагревании скорость движения электронов увеличивается, растет запас их кинетической энергии, и при определенной температуре ее уже оказывается достаточно, чтобы преодолеть силы, удерживающие электрон внутри металла. Сначала вылетают наиболее быстрые электроны, и чем выше температура, тем все больше электронов покидает проводник.

Процесс испускания электронов, происходящий при нагревании проводников, носит название термоэлектронной эмиссии. В металлах заметная эмиссия электронов начинается при температуре 2000°Ц. Правда, далеко не каждый металл выдерживает такую температуру, не плавясь! Но есть и тугоплавкие. Вольфрам, например, при температуре белого каления (2200°) еще достаточно прочен.

Первые радиолампы потому и назывались лампами, что они светились не хуже обычных осветительных. Это и понятно: ведь нужно было обеспечить хорошую эмиссию. Свечение электронной лампы не мешает эмиссии, но на нагревание нити до белого каления идет слишком много электроэнергии, такие лампы неэкономичны. Поэтому очень важно было повысить эмиссионную способность нагретой нити. Раньше для этого добавляли к вольфраму торий или барий, а сейчас нить покрывают соединениями окислов бария, стронция или других металлов. Все эти меры облегчают выход электронов из металла, и термоэлектронная эмиссия начинается при более низких температурах — при 500—700°Ц.

В современных радиолампах часто используют подогревный катод. Он представляет собой трубочку, внутри которой протянута нить, накаленная электрическим током.

Самое важное условие высокой эмиссии при нагревании — это вакуум. Если бы Эдисон не откачал из лампы воздух, он едва ли заметил бы, что от пластинки к нити течет ток. Вырываясь из раскаленного металла, электроны сразу встретились бы с атомами и молекулами воздуха, быстро потеряли бы свою энергию и не добрались бы до пластинки. Поэтому нить, испускающую электроны, помещают в стеклянный или металлический баллон, из которого откачан воздух. Давление в баллоне в несколько миллиардов раз меньше атмосферного, и электроны распространяются здесь практически беспрепятственно. Из миллиона электронов только один может встретиться с молекулой газа.

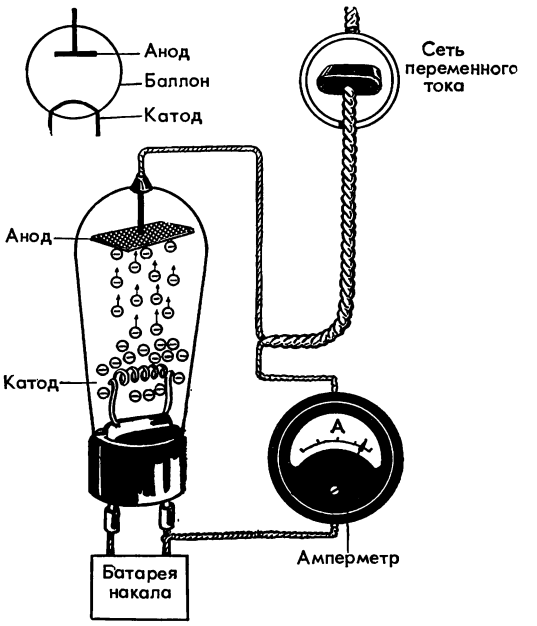



Рис. 11. Схема работы диода.

Простейшая радиолампа — диод (рис. 11) — состоит из раскаленной нити, испускающей электроны, и пластинки, помещенной на их пути. Нить — это катод, пластинка — анод. К катоду приложено отрицательное напряжение, к аноду — положительное. Если диод включен в цепь переменного тока, он пропускает ток только в одном направлении, т. е. работает в те периоды, когда к аноду приложено положительное напряжение. Когда же к аноду подведено отрицательное напряжение, диод оказывается «запертым» и ток через него не проходит.

Как правило, напряжение в цепях переменного тока изменяется строго периодически: отрицательные и положительные полупериоды следуют друг за другом через равные промежутки времени. Изменения переменного напряжения обычно изображают синусоидой — кривой, которая очень напоминает волну.

Процессы, происходящие в диоде, нагляднее всего можно представить графиком. На рисунке 12 изображена синусоида напряжения, которое подается между анодом и катодом диода. Ток течет через прибор, включенный в цепь диода, только когда к аноду лампы приложены положительные значения напряжения. На втором графике видно, что этот ток пульсирующий, он течет только в одном направлении, но напряжение его меняется и даже прерывается.

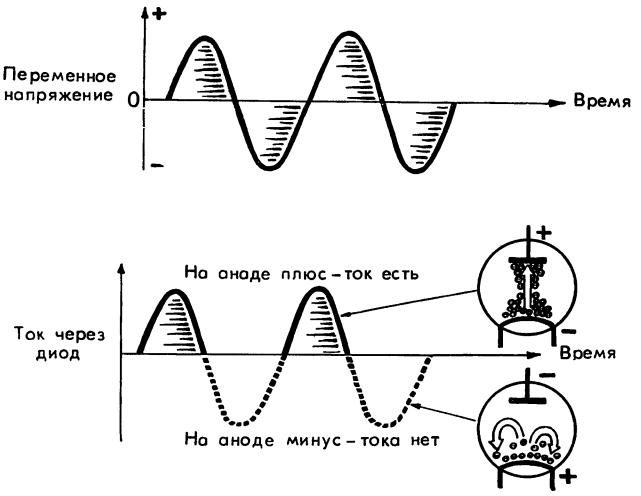



**Рис. 12. Диод выпрямляет переменный электрический ток.**

Даже небольшое положительное напряжение «открывает» диод, так как и без приложенного напряжения через диод течет при достаточной эмиссии «начальный» ток, правда очень небольшой.

Настоящую революцию в радиотехнике совершила другая лампа, появившаяся вслед за диодом. В 1906 г. американец Ли де Форест ввел в радиолампу **третий электрод**. Между катодом и анодом он расположил пластинку с отверстиями. Отверстий было так много, что электрод напоминал сетку. До сих пор его так и называют **сеткой**, хотя теперь он больше похож на спираль. По числу электродов лампу назвали т р и о д о м (рис. 13).

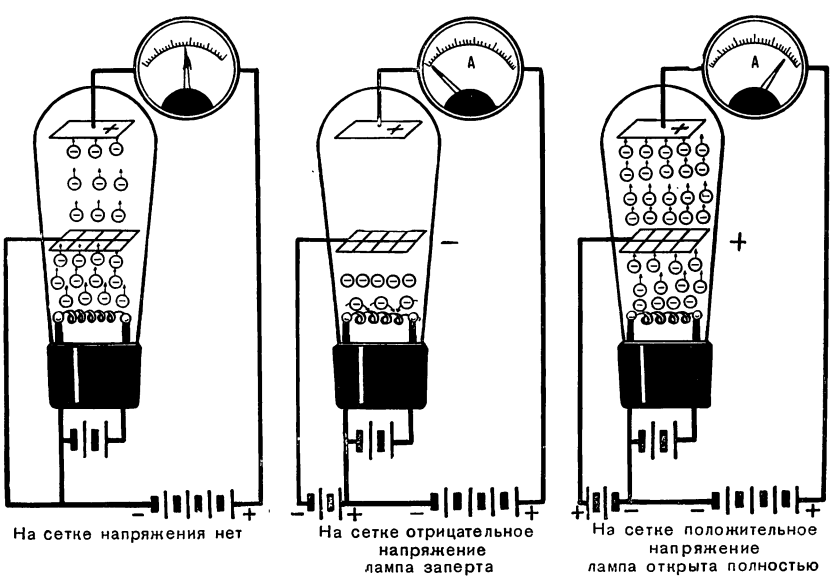
Если на сетку не подать напряжение, электроны будут свободно пролетать через нее к аноду, практически не задерживаясь: отверстие даже в самой густой сетке неизмеримо больше, чем электрон.

Отрицательный заряд на сетке отталкивает электроны, и только некоторые из них могут проскочить через нее. Можно, разумеется, так повысить отрицательный заряд, что сетка полностью «запрет» лампу и ток прекратится. Для этого достаточно отрицательное напряжение всего в несколько вольт. Это напряжение так и называется **напряжением запирания.**

Если же подать на сетку положительное напряжение, она начнет притягивать электроны, разгонять их. Большинство из них так разгоняется, что проскакивает сетку «с ходу». А за ней электроны еще сильнее притягивает анод. Положительный заряд сетки помогает добраться до анода и тем электронам, скорость которых так мала, что без ускорения они не долетели бы до него.

Те же электроны, которые «воткнутся» в «проволочки» сетки или пролетят очень близко от них и притянутся ими, создадут побочный «сеточный ток». Но обычно он ничтожно мал по сравнению с основным, анодным током.

Пока на сетке отрицательное напряжение, лампа заперта. Сетка не позволяет ни одному электрону подойти к аноду, но катод продолжает их беспрерывно испускать. Между катодом и сеткой возникает так называемое э л е к т р о н н о е о б л а к о. Его плотность увеличивается до тех пор, пока оно само не станет выталкивать электроны, вылетающие из катода обратно. Когда на сетку подается положительное напряжение, к аноду устремляется из электронного облака целая ла-



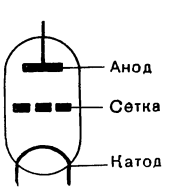




**Рис. 13. Схема работы триода.**

вина электронов. Электронное облако — это резерв свободных электронов, которыми так эффективно управляет сетка.

Катод испускает за секунду строго определенное количество электронов, оно зависит от температуры катода и от металла, из которого он сделан. При появлении на сетке положительного потенциала все электронное облако притягивается к аноду. В этот момент анодный ток достигает наибольшей величины,

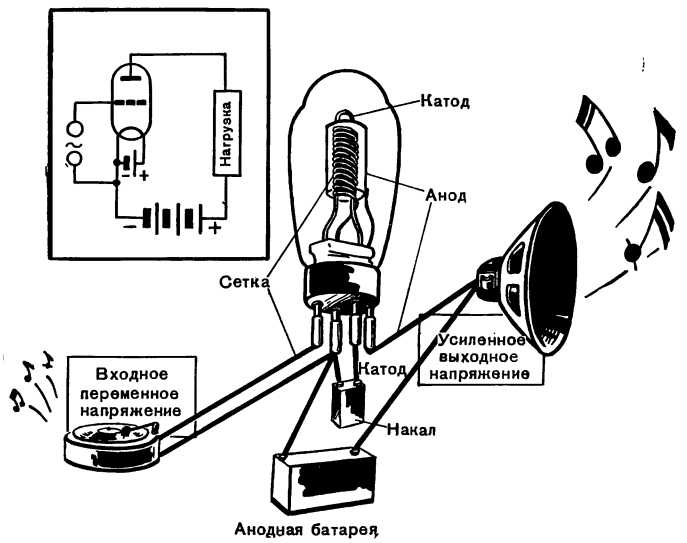



**Рис. 14. Триод усиливает слабое переменное напряжение тока.**

он так и называется **током насыщения** радиолампы. Если положительное напряжение на сетке и на аноде увеличить, ток, идущий через лампу, не станет больше, ибо катод при данной температуре не может испускать электронов больше.

Попробуем теперь подать на сетку переменное напряжение (рис. 14), т. е. увеличивать и уменьшать с какой-то частотой (столько-то раз в секунду) потенциал сетки. Очевидно, тем самым мы будем ослаблять или увеличивать анодный ток в такт с изменениями напряжения на сетке. На аноде появится копия всех изменений напряжения, поданного на сетку, но копия значительно увеличенная. С помощью небольшого переменного напряжения сетка превращает большую энергию анодной батареи в энергию переменного напряжения, которое точно повторяет изменения напряжения на сетке.

Лампа с сеткой обладает еще одним ценнейшим свойством — **безынерционностью**. Это значит, что изменение напряжения на сетке мгновенно изменяет величину анодного тока, так как скорость электронов в вакууме громадна.

Сетка совершила в технике революцию. Она позволила усиливать слабые радиосигналы во много тысяч раз. Кроме того, с ее помощью можно генерировать радиоволны.

**Ламповые генераторы** быстро вытеснили все другие приборы, применявшиеся в то время, так как они были проще, надежнее и позволяли передавать по радио речь и музыку. Они легко перестраиваются на волну любой длины и не мешают друг другу. С появлением генераторных ламп, радиотехника стала стремительно развиваться. Усилительные качества диодов и триодов непрерывно улучшались.

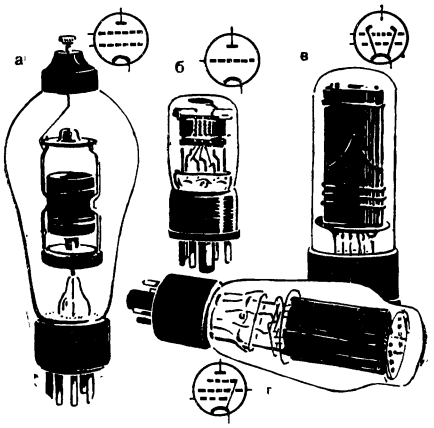
В 1920 г. один из основоположников современной радиотехники, М. А. Бонч-Бруевич, сконструировал в Нижегородской радиолаборатории мощную электронную генераторную лампу с водяным охлаждением. В том же году были проведены первые пробные передачи по радио речи и музыки. А через год был передан по радио из Москвы концерт для Берлина. Это была рекордная для того времени дальность музыкальной передачи. Немцы прекрасно слышали музыку, но ответить таким же концертом не могли: в Германии в то время радиотехника была еще слабой. В 1933 г. в Москве была создана самая большая по тому времени радиостанция им. Коминтерна, мощностью в 500 *квт*.

Триод открыл для радио новый период. Ученые, изобретатели, инженеры непрерывно совершенствовали электронную лампу, улучшали ее качества и расширяли область ее применения. Появились лампы с двумя, тремя, четырьмя, пятью и даже шестью сетками. С помощью этих ламп стало возможным управлять электрическими колебаниями и преобразовывать их.

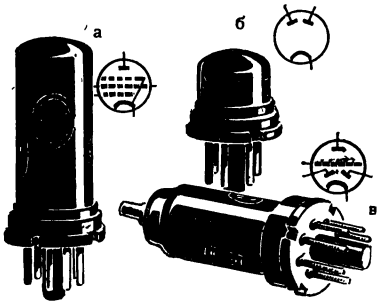
## ЧТО ДАЛА ВТОРАЯ СЕТКА

Чтобы освоить короткие волны, нужно было усилить напряжения высокой частоты. Усилители на триодах для этого не годились: они работали неустойчиво и ненадежно.

Две любые пластины, разделенные промежутком, образуют конденсатор: в триоде между проволочными выводами от сетки и анода тоже образуется емкость (конденсатор), и она значительна. А емкость, не пропуская постоянный ток, свободно пропускает переменный, особенно ток высокой частоты. Поэтому при усилении высоких




**Радиолампы со стеклянными баллонами: *а*) тетрод, *б*) триод, *в*) двойной тетрод, *г*) пентод.**




**Радиолампы, стеклянные баллоны которых защищены металлическими экранами: *а*) пентод, *б*) двойной диод, *в*) диод плюс триод.**

частот емкость между сеткой и анодом начинала оказывать вредное воздействие. Часть усиленного напряжения поступает с анода через эту емкость обратно на сетку. Работа лампы становится неустойчивой, возникает самовозбуждение, лампа начинает работать как генератор, и усиление прекращается.

Устранить вредное действие этой емкости удалось, поместив между первой управляющей сеткой и анодом еще одну, экранирующую сетку. Емкость между сеткой и анодом уменьшилась.

Так как в лампе стало четыре электрода, ее назвали тетродом. Но и тетрод не свободен от недостатков: экранирующая сетка слишком усердно помогает разгонять электроны, и они с такой силой ударяются в анод, что выбивают из оболочек его атомов так называемые **вторичные электроны**. Часть этих электронов притягивается обратно к аноду, а часть долетает до экранирующей сетки и создает обратный — динатронный ток. Этот эффект, называемый динатронным, приводит к самовозбуждению усилителя или к сильным искажениям сигнала.

И вот между экранирующей сеткой и анодом поместили еще одну, чтобы не пускать вторичные электроны на экранирующую сетку. Третья сетка не только предотвращает последствия динатронного эффекта: в лампе еще больше уменьшается емкость между управляющей сеткой и анодом, усиление тока лампой возрастает и становится в несколько десятков раз больше, чем у триода. Эта лампа названа пентодом. Пентод оказался идеальной лампой для усиления высокочастотных сигналов.

Введение четвертой, пятой и шестой сеток было вызвано появлением супергетеродинного метода приема, о котором будет рассказано ниже.

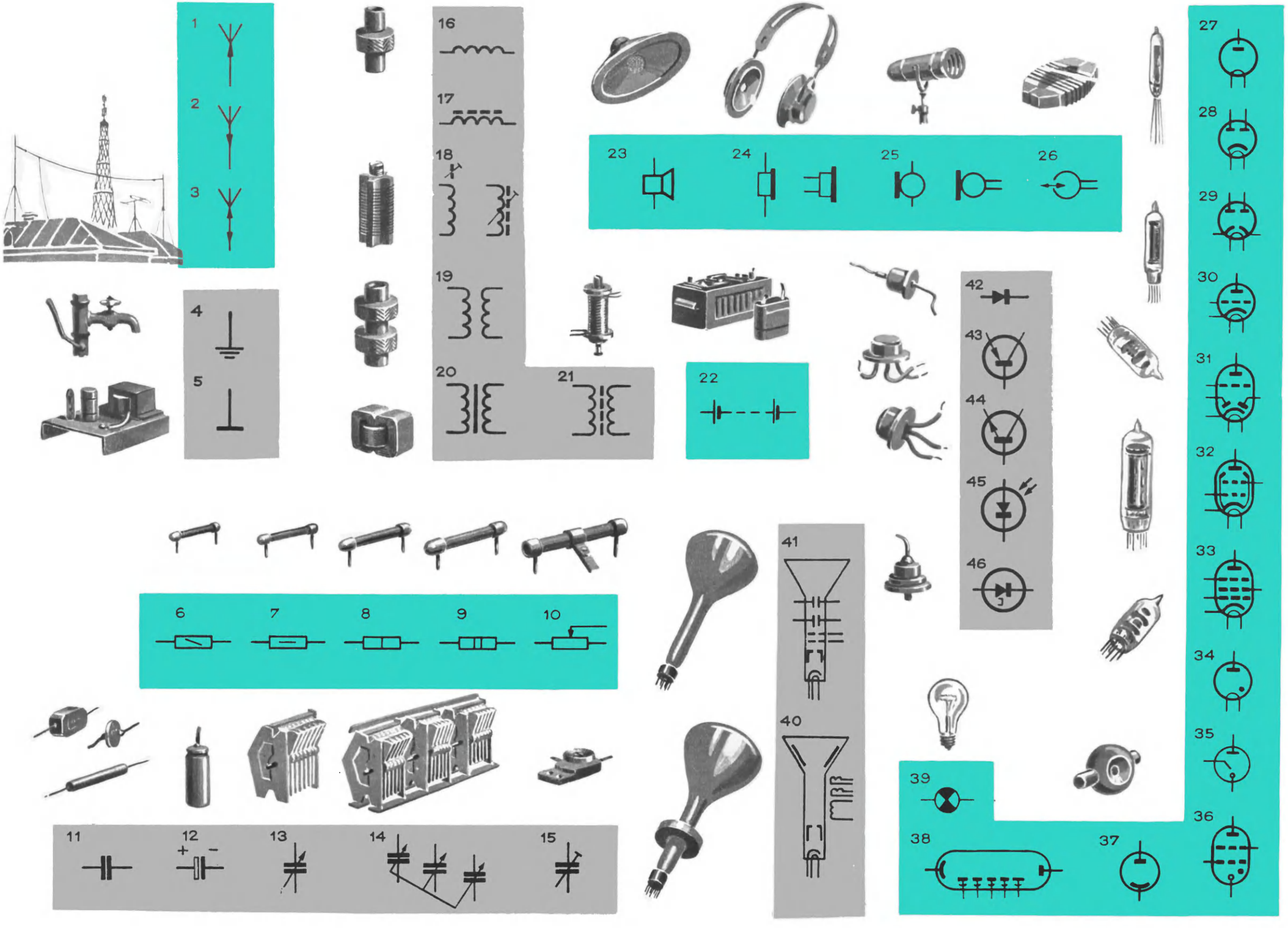
Радиолампы совершенствовались не только путем добавления сеток. Появились комбинированные лампы: в одном стеклянном баллоне и часто над одним катодом размещались две, а то и три лампы, например два диода и триод или два триода и т. д. Такие лампы очень удобны и практичны, так как для них нужно меньше катодов, чем в соответствующем наборе ординарных ламп, следовательно, на их нагревание расходуется меньше энергии.

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИОДА В РАДИОТЕХНИКЕ

Во входном контуре приемника, настроенном в резонанс с передающей радиостанцией, возникают электрические колебания высокой частоты, в сотни и тысячи мегагерц. Их можно усилить радиолампами. Но если эти усиленные высокочастотные колебания подать в катушку громкоговорителя, мы ничего не услышим: мембрана громкоговорителя или телефона не может следовать за их частотой и совершать миллионы колебаний в секунду. Но даже если бы это было возможно, мы бы все равно ничего не услышали: наше ухо слышит, лишь когда мембрана колеблется со звуковой частотой от 16 до 16 000 *гц*. Усиленный высокочастотный сигнал не может привести в действие и телеграфный аппарат.

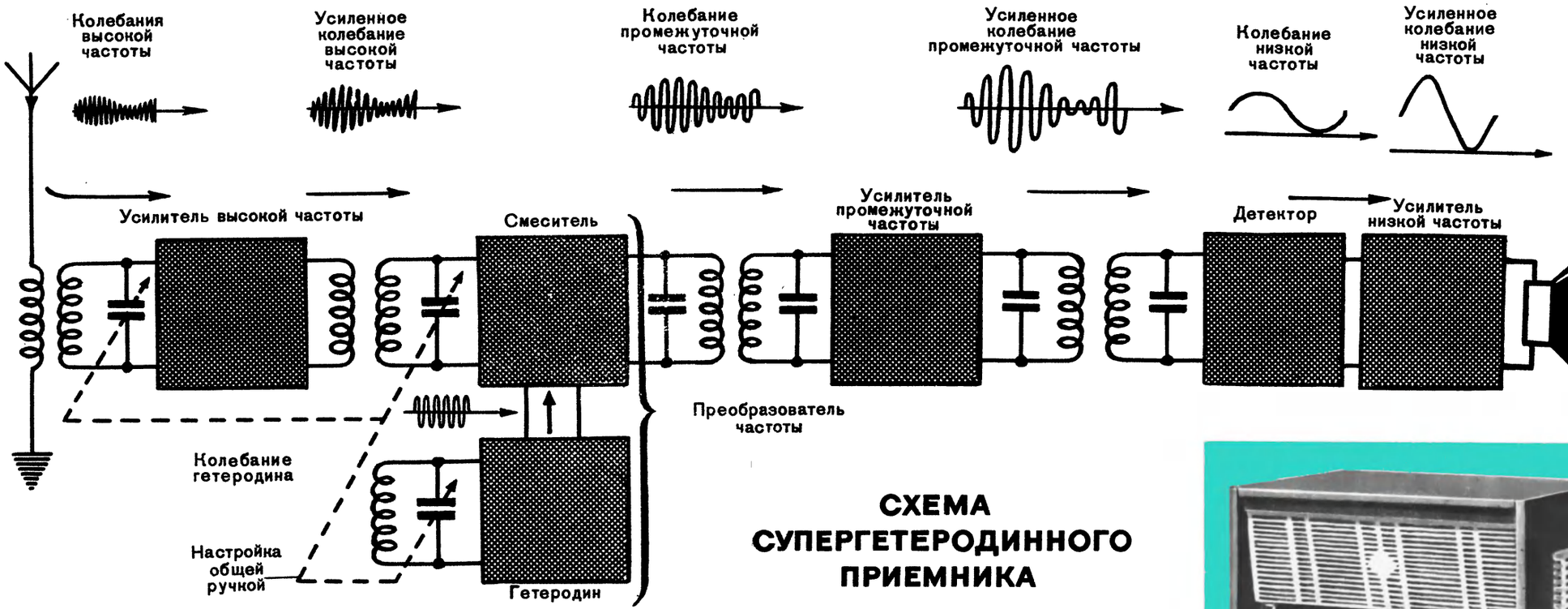
Если же это переменное высокочастотное напряжение приложить к диоду, он выпрямит его, и через диод потечет пульсирующий, но постоянный по направлению ток, которым можно привести в действие динамик, реле, звонок и т. д.

На передающей станции высокочастотные электромагнитные колебания модулируются звуковой частотой. В приемнике эти высокочастотные колебания выпрямляются, и через




### *ОБОЗНАЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОСХЕМ*

**1 — передающая антенна; 2— приемная антенна; 3— приемо-передающая антенна; 4— заземление; 5— присоединение к корпусу; 6, 7, 8, и 9— сопротивления (редисторы) на мощность соответственно в 0,25, 0,5, 1,0 и 2,0 *в*; 10— переменное сопротивление (потенциометр); 11 — конденсатор (ёмкость); 12— электролитический конденсатор; 13— переменный конденсатор; 14— блок переменных конденсаторов; 15— полупеременный конденсатор (траммер); 16 — катушка индуктивности (индуктивность); 17 — катушка индуктивности с ферритовым сердечником; 18— катушка индуктивности с перестраиваемым сердечником; 19—трансформатор без сердечника; 20 — трансформатор с железным сердечником; 21— трансформатор с ферритовым сердечником; 22— батарея гальванических элементов; 23— электродинамический громкоговоритель; 24— наушники; 25— микрофон; 26— универсальная записывающая магнитофонная головка; 27— диод; 28— двойной диод с катодом прямого накала; 29— двойной диод; 30— триод; 31— двойной диод-триод; 32— лучевой тетрод; 33— пентод; 34— газовый диод; 35— разрядник с поджимом; 36— тиратрон; 37— фотодиод; 38— фотоэлектрический умножитель; 39— лампочка накаливания; 40— электроннолучевая трубка с магнитным отклонением луча; 41 — электроннолучевая трубка с электростатическим отклонением луча; 42— полупроводниковый диод (транзистор) *n-p-n* типа; 43— полупроводниковый триод *p-n-p* типа; 44— полупроводниковый фотодиод; 45— туннельный диод.**

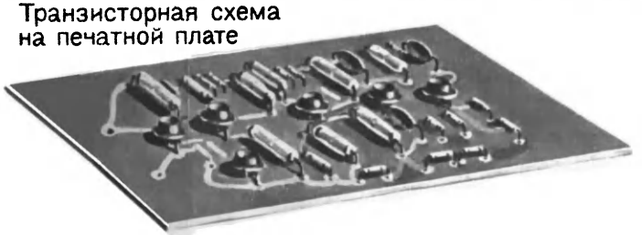



## СХЕМА СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМНИКА

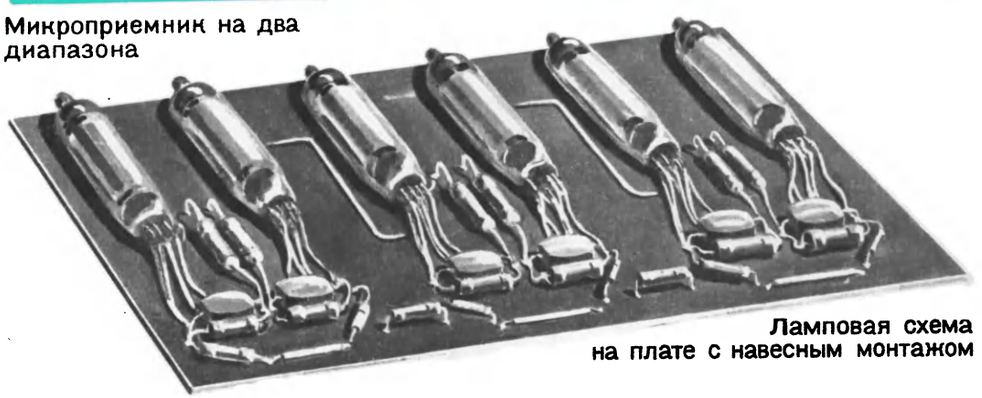
Микроприемник на два диапазона

«Пальчиковая» лампа

Транзисторная схема на печатной плате

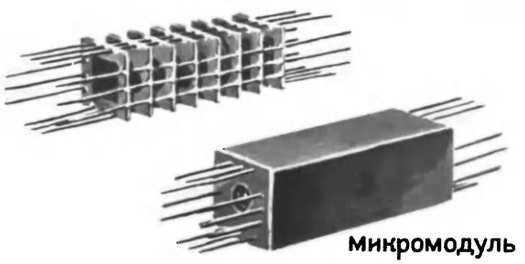


Детали микромодуля



Ламповая схема на плате с навесным монтажом

Полупроводниковые триоды и диоды



Микромодуль

диод идет постоянный ток. Но сила тока меняется в такт с колебаниями модулирующей звуковой частоты. Если этот ток пропустить через катушку телефона, мембрана колеблется именно с той частотой, которой модулирована радиочастота передающей радиостанции.

Этот процесс, в сущности обратный процессу модулирования, называется детектированием (обнаружением). С помощью диода осуществляется также и манипуляция — передача по радио сигналов азбукой Морзе: излучение радиочастоты между точками и тире прерывается.

Диод иногда применяется в радиотехнике, просто чтобы получить постоянный ток из промышленного тока переменной частоты (обычно 50 *гц*). Постоянный ток необходим для питания усилительных ламп в радиоприемниках и генераторных ламп в радиопередатчиках. После выпрямления диодом получается пульсирующий постоянный ток. Чтобы его «сгладить», на выходе выпрямителя устанавливают фильтр, состоящий из емкости и индуктивности (дроссель).

## ПЕРЕДАЧА И ПРИЕМ РАДИОПРОГРАММЫ

Контур и лампа — основа радиоприемника. Но не меньшую роль контур и лампа играют в передатчике — в генераторе радиочастотных колебаний.

Колебательный контур генератора включается в анодную цепь лампы. Рядом с основной катушкой располагается вспомогательная сеточная катушка. Если в контуре происходят незатухающие колебания, направление тока периодически меняется. Вместе с этим меняется и магнитное поле в катушке контура. Это переменное магнитное поле воздействует на витки близко расположенной сеточной катушки и наводит в ней переменное напряжение той же частоты. Напряжение подается на сетку, которая заряжается попеременно то положительно, то отрицательно. В соответствии с этим автоматически изменяется сила тока и в анодной цепи.

Эти изменения воздействуют на катушку контура, создавая в нем дополнительные напряжения, которые не позволяют затухнуть собственным колебаниям контура. По сути дела, на сетку поступает с контура небольшая доля напряжения высокой частоты, напряжение это усиливается и «в такт» снова подается на контур. Так как в анодную цепь это напряжение приходит усиленным, оно с лихвой покрывает все потери электромагнитной энергии контура, и колебания не затухают. Контур поддерживает свои колебания за счет энергии анодной батареи.

Таким образом, источник энергии в генераторе — энергия анодной батареи, которая в схеме генератора превращается в энергию незатухающих, периодических электромагнитных колебаний. Из нее же черпается энергия на покрытие потерь в контуре, на нагрев лампы, проводов и т. п.

Когда хотят излучить колебания в пространство, рядом с основной катушкой помещают еще одну — антенную. В ней появляются электромагнитные колебания той же частоты и идут через антенну.

Ламповый генератор создает электромагнитный сигнал — радиоволну; ее частота определяется настройкой контура. Но чтобы передать какое-либо сообщение, а тем более речь, музыку или изображение, нужно на основной сигнал, на несущую частоту, наложить дополнительные сигналы. Таким образом, радиосигнал — это не одна непрерывно излучаемая частота: его основная несущая частота «раскрашена» более низкими частотами. При передаче речи и музыки на несущую частоту накладываются звуковые частоты: в телевидении — сигналы изображения, так называемые видеочастоты; в радиолокации — импульсы; в телеграфии — точки и тире. Процесс такой смысловой «раскраски» сигнала называется модуляцией, а устройства, воздействующие на высокочастотный сигнал генератора и управляющие его колебаниями «в такт» с изменениями частоты передаваемого сигнала, носят название модуляторов.

При наложении модулирующих частот спектр передаваемого сигнала расширяется. Он становится тем шире, чем выше модулирующие частоты. В середине спектра лежит основная, несущая частота; по бокам — модулирующие.

При передаче речи или музыки на сигнал поочередно накладываются все звуковые частоты, из которых состоит речь или мелодия. Ее ширина определяется наивысшей частотой модуляции. Набор частот, из которых состоит **спектр сигнала**, зависит от сложности передаваемого сообщения. Так, для передачи речи достаточно частотной полосы в 2—4 *кгц*, для музыки — 6—8 *кгц*, а для телевизионного изображения необходима полоса в тысячу раз более широкая — 6 *Мгц*. Для цветного изображения

нужно уже 12—15 *Мгц*, а радиолокационные сигналы занимают спектр шириной до 20 *Мгц*. Спектру сигнала должна соответствовать **полоса пропускания** резонансных контуров в усилителях приемного устройства. Она выбирается равной спектру или несколько шире его. Чем сложнее сигнал, тем более широкополосным должно быть приемное устройство и тем сложнее оно.

Радиоволны вызывают в антенне множество высокочастотных переменных токов. **Входной контур** приемника выбирает из них тот, на частоту которого он настроен. В контуре устанавливаются электрические колебания с частотой передающей станции. Сила сигнала пока очень низка, но то, что подано на сетку первой усилительной лампы, усиливается в несколько сот раз и передается на следующий контур, включенный в анодную цепь и настроенный на ту же частоту. С этого контура колебания можно подать на сетку второго триода и вновь усилить сигнал. Пройдя несколько таких **каскадов усиления высокой частоты**, колебания становятся в тысячи и миллионы раз сильнее, чем они были в приемной антенне.

Теперь их можно подать на **детектор** — обнаруживатель радиосигналов. Детекторная лампа выпрямит переменное напряжение, через нее потечет постоянный ток. Он просигнализирует, что через контуры приемника прошел сигнал той частоты, на которую настроены контуры каскадов усиления. А если сигнал был промодулирован частотами речи или музыки, частота его изменений будет соответствовать звуковым частотам, которыми был промодулирован сигнал. Этот ток, пропущенный через динамик, заставит его звучать, и мы услышим то, что принесла нам радиоволна.

Так работали простейшие **приемники прямого усиления**. Названы они так были потому, что высокочастотный сигнал усиливается в них прямо, без каких-либо преобразований. Все контуры их каскадов настроены на одну частоту. Долгое время существовали только такие радиоприемники. Современные нам приемники устроены иначе. Они отличаются от приемников прямого усиления не только техническим совершенством, качеством ламп и отделки, но и принципом работы. Такой приемник часто называют **супергетеродинным** или просто «супером» (см. табл. у стр. 233).

В супергетеродинном приемнике, как и в приемнике прямого усиления, сигнал тоже усиливается радиолампами, но не на частоте сигнала, а на так называемой промежуточной частоте. Эта частота постоянна на всех частотах настройки и на всех диапазонах приемника.

Преобразование колебаний принятого сигнала в колебания промежуточной частоты происходит обычно сразу же после антенны, в так называемом **преобразовательном каскаде приемника**. Пришедший сигнал смешивается с сигналом «местного гетеродина», т. е. маломощного генератора, частота которого близка к частоте сигнала. Получающаяся в результате такого смешения промежуточная частота усиливается и подается на ламповый детектор.

Гетеродинный метод резко увеличил чувствительность приемников, т. е. дальность их действия, и улучшил качество приема. В наибольшей мере положительные свойства супергетеродина сказываются при работе на коротких волнах. «Супер» гораздо сложнее приемников прямого усиления, но его преимущества так велики, что в радиовещании приемники прямого усиления уже не применяются.

## СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОЛАМПЫ

С развитием обычных усилительных радиоламп их размеры непрерывно уменьшались. Вместо старых радиоламп с большим пластмассовым цоколем (в нем расположены штыри для крепления лампы на панели) появились **пальчиковые** лампы (рис. 15). В диаметре такая лампа действительно не толще пальца, а длиной в 2—3 раза меньше. Вслед за пальчиковыми конструкторы создали сверхминиатюрные лампы — не толще карандаша. Качество радиоламп, разумеется, при этом не снизилось.

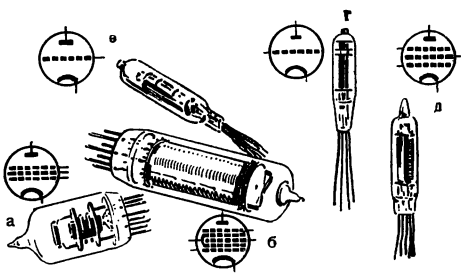



**Рис. 15. «Пальчиковые» радиолампы: *а*) пентод, *б*) гептод; субминиатюрные лампы: *в*) триод, *г*) триод, *д*) пентод.**

Созданы и совсем крошечные лампы — чуть больше рисового зерна. Это, как правило, диоды или триоды. По размерам они успешно соперничают с кристаллическими приборами, но из-за малой практичности применяются редко.

На радиотрансляционных узлах и передающих вещательных станциях применяются мощные генераторные радиолампы высотой почти в человеческий рост (рис. 16). На их анодах выделяется такая огромная мощность, что нужно применять водяное охлаждение.

Но если обычные триоды, пентоды и т. д. в процессе усовершенствования сохранили все свои особенности и свойства, то с переходом на все более короткие волны потребовались лампы принципиально нового типа.

Мы говорили, что при усилении длинных, средних и коротких волн электронную лампу можно было считать безынерционным прибором. Она мгновенно реагирует на все изменения тока, как бы часто они ни происходили.

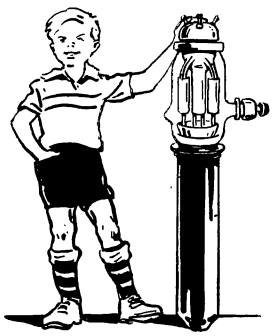


**Рис. 16. Современная мощная генераторная лампа с водяным охлаждением.**

Время пролета электронов от катода до сетки гораздо меньше, чем период применяемых частот. По сравнению со скоростью электрона частота даже коротких волн — это медленный процесс.

С освоением УКВ положение изменилось. На огромных частотах, соответствующих волнам диапазона УКВ, временем пролета электронов в лампе пренебрегать стало нельзя. Так, при волне в 1 *м* (300 тыс. *кгц*) время пролета электрона до сетки (0,003 микросекунды) становится равным периоду колебания, а при волне в 10 *см* — уже в 10 раз больше него. Значит, электрон, вылетевший из катода в тот момент, когда сетка была заряжена положительно, перестанет испытывать ее притяжение, еще не долетев до сетки. Мало того, сетка оттолкнет его, так как напряжение на ней уже успеет переменить свой знак.

Конструкторы стали уменьшать расстояние между электродами, размеры ножек ламп и других соединительных элементов. Так появились лампы типа **«желудь»**, в которых расстояние между электродами сокращено до предела

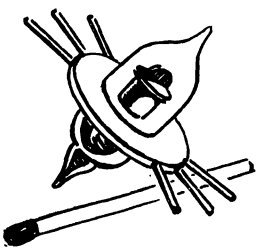


**Рис. 17. Радиолампа «желудь» рядом с обычной спичкой.**

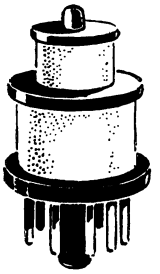


**Рис. 18. «Маячковая» радиолампа.**

(рис. 17). В результате конструктивных улучшений «желуди» эффективно работают на волнах до 1 *м*.

Для волн 10—20 *см* пришлось создать уже совсем необычные — **«маячковые»** лампы (рис. 18). Выводы катода, сетки и анода сделаны здесь в виде дисков и проходят прямо через стекло баллона наружу: через штырьки в цоколе подводится только напряжение накала.

Но «желуди» и даже «маячковые» лампы непригодны для волн в 2—3 *см*. Пришлось сконструировать лампу с принципиально новым способом управления электронным потоком.

Первая лампа этого типа — м а г н е т р о н (рис. 19). У нее всего два электрода — катод и анод, на анод подается напряжение в несколько тысяч вольт. Сетки у магнетрона нет, но зато в нем есть мощный постоянный магнит. Он расположен так, что силовые линии создаваемого им поля направлены параллельно катоду.

Магнитное поле искривляет путь движущихся в нем электронов, если они летят перпендикулярно его силовым линиям. Подбирая соответствующее магнитное поле и напряжение на аноде, можно заставить электроны двигаться круговым потоком у самой поверхности анода.

Круглый цилиндр катода окружен массивным анодом. Электроны, вылетающие из катода, отклоняются полем магнита и пополняют электронный поток, отдающий свою энергию на поддержание высокочастотных колебаний.

Магнетрон сам генерирует эти колебания; ему не нужен, как триоду, контур с проволочной катушкой связи. Его

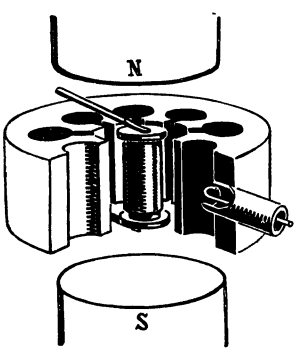



**Рис. 19. Схема магнетрона.**

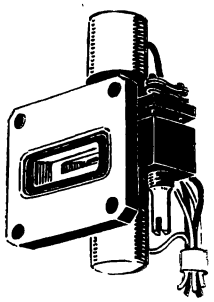


Рис. 20. Внешний вид клистрона.

анод — массивное медное кольцо с многочисленными цилиндрическими камерами (объемными резонаторами). Через узкие щели камеры сообщаются с пространством вокруг катода, где создается круговой поток электронов. Объемные резонаторы и есть колебательные контуры для сверхвысоких частот.

Частота колебаний, возникающих в резонаторах, определяется их размерами. Электроны, которые движутся вблизи щелей анода, возбуждают в резонаторах колебания и отдают при этом свою энергию. Потеря энергии приводит к уменьшению скорости. Поток электронов уплотняется. Можно подобрать резонаторы определенного размера, величину магнитного поля и напряжения, так что участки уплотненного электронного потока будут пролетать мимо щелей резонаторов как раз в те мгновения, когда поток передает энергию колебаниям объемного контура. Таким образом, электронный поток поддерживает эти колебания, и они становятся незатухающими.

В магнетронах удается получать колебания сверхвысоких частот с длиной волны до 0,5 *см*. Впервые магнетроны были применены на радиолокационных станциях, и до сих пор без них не обходится ни один радиолокатор.

Другой прибор для генерирования ультракоротких волн — к л и с т р о н (рис. 20). Этот

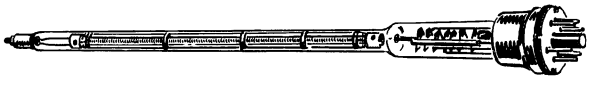


Рис. 21. Внешний вид радиолампы бегущей волны.

генератор менее мощный, чем магнетрон, но он тоже объединяет в себе функции лампы и контура. Колебания в резонаторе клистрона, как и в магнетронной системе, поддерживаются потоком электронов неодинаковой плотности. Но поток здесь не кольцевой, а прямолинейный. Электроны излучаются катодом в одном направлении, ускоряются электродом и пролетают мимо резонаторов.

Наиболее часто применяется так называемый отражательный клистрон. В нем поток электронов, разделенный резонатором на зоны уплотнения и разрежения, встречает на своем пути электрод, заряженный отрицательно, и, отразившись от него, направляется обратно к резонатору.

Третья группа ламп нового типа — это лампы б е г у щ е й в о л н ы (рис. 21) и лампы о б р а т н о й в о л н ы. Они широко применяются для диапазона сантиметровых волн. Принцип их работы основан на взаимодействии магнитного поля и электронного потока. Электромагнитное поле распространяется, как известно, со скоростью света. Электронам же и при напряжениях в несколько тысяч вольт можно сообщать лишь одну десятую скорости света. Поэтому, чтобы заставить взаимодействовать магнитное поле и электронный поток, нужно уменьшить скорость распространения электромагнитной волны до скорости электронного потока.

Но скорость движения поля не затормозишь. Инженеры нашли выход, они заставили поле проходить от «входа» до «выхода» более длинный путь, чем путь электронов.

Лампа бегущей волны похожа на длинную пробирку с цоколем. Вдоль нее проложена спираль, по которой движется электромагнитная волна. Вместе с волной вокруг витков спирали обегает и электромагнитное поле. А пучок электронов движется внутри спирали вдоль ее оси. Поле перемещается к выходу во столько раз медленнее, во сколько раз длина провода одного витка больше шага спирали.

Когда сигнал, т. е. электромагнитное колебание, идет по спирали, он воздействует на равномерный поток электронов, перегруппировывая в нем электроны по их скоростям. Сгруппированный поток, продвигаясь вдоль оси спирали, в свою очередь воздействует «в такт» на электромагнитное поле, отдавая ему энергию. По мере продвижения по спирали поле непрерывно усиливается, и, если спираль лампы достаточно длинна, выходное напряжение значительно превысит входной сигнал.

Лампы бегущей волны могут усиливать волны длиной от 20 и до 3 *см*, на что не способны радиолампы никаких других типов. Применяя такие лампы, можно построить генератор, который сможет перестраиваться в широком диапазоне частот.

Этими тремя типами ламп в основном и ограничиваются электровакуумные приборы, работающие в диапазоне сверхвысоких частот. Самые короткие волны 0,5—2 *см* нельзя усилить даже лампами бегущей волны, но их можно генерировать магнетронами и клистронами.

В последнее время создано много новых типов сверхвысокочастотных генераторных и усилительных ламп. Во всех этих лампах используются те же самые методы управления электронным потоком, что и в клистронах, магнетронах и лампах бегущей волны.

## ВМЕСТО РАДИОЛАМПЫ — КРИСТАЛЛ

В послевоенные годы у радиолампы появился сильный соперник — **полупроводниковые** (кристаллические) приборы. Они успешно вытесняют радиолампу даже из таких, казалось бы, прочно завоеванных ею областей применения, как радиоприемники и телевизоры.

Первые кристаллические приборы — кристаллические детекторы — появились в начале 20-х годов. Во время второй мировой войны они широко применялись в приемниках радиолокационных станций для детектирования и выпрямления сигналов. С тех пор сфера применения кристаллических электронных устройств непрерывно расширяется.

Для изготовления таких приборов используют химические материалы, электрические свойства которых ставят эти материалы в промежуточное положение между проводниками и изоляторами. Эти вещества называют полупроводниками (см. ст. «Полупроводники»). Применяя их, удалось создать полупроводниковые триоды (транзисторы), в которых, как и в электронной лампе, можно управлять электронным потоком. Используя транзисторы, научились генерировать, усиливать и преобразовывать высокочастотные сигналы.

По сравнению с электронной лампой транзисторы обладают рядом преимуществ. У них очень небольшие размеры. Им не нужен дополнительный источник тока для нагрева нити; поэтому они практически не нагреваются. Транзистор потребляет значительно меньше энергии. Он более надежен в работе, меньше боится ударов, тряски, воздействия влаги. Срок службы полупроводниковых приборов исчисляется десятками тысяч часов, тогда как обычные вакуумные усилительные лампы могут работать не более 3 тыс. часов.

Эти свойства полупроводниковых приборов оказались особенно ценными в тех электронных устройствах, для которых важны небольшие размеры, экономичность и высокая надежность: в электронно-счетных машинах, в оборудовании космических ракет и спутников Земли, в разнообразном военном радиооборудовании.

Устройства на полупроводниках поражают своими малыми размерами. Электронно-счетные аппараты, которые раньше занимали целые залы, уменьшились до габаритов шкафа. Сложный радиолокатор, едва размещавшийся на линкоре, теперь может быть установлен на самолете. Радиоприемник, работающий на транзисторах, можно скомпоновать в обычном портсигаре.

Но и это далеко не предел. Уже появились в продаже советские самые маленькие в мире, меньше спичечной коробки, приемники на микропленках.

Детали подобных радиосхем, в том числе и транзисторы, наносятся фотохимическим способом на фарфоровое основание или в вакууме напылением. Схемы из микродеталей самых различных конструкций все шире применяются на практике. Как говорят радиоинженеры, идет процесс **микроминиатюризации радиоаппаратуры**.

Вершина этого процесса — так называемая **твердая схема**; все ее элементы — сопротивления, конденсаторы, транзисторы, диоды и т. п.— формируются специальной обработкой в одном полупроводниковом кристалле. Такая схема действительно «твердая»: кусок вещества представляет собой усилитель или приемник электрических сигналов!

Но, как ни велики преимущества полупроводниковой техники, в ряде случаев электронные лампы по-прежнему незаменимы, например для усилителей в генераторах большой мощности. Одним словом, полупроводниковые и электровакуумные приборы, несмотря на конкуренцию, не только сосуществуют, но и хорошо дополняют друг друга.

Современная радиотехника использует сотни различных типов электровакуумных, газонаполненных и полупроводниковых приборов. Среди них, кроме обычных радиоламп и транзисторов, электронные стабилизаторы напряжений, газоразрядные лампы, электронные коммутаторы-переключатели, фотоэлементы, фотоумножители, электронно-оптические преобразователи и, наконец, электроннолучевые трубки.

## ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ

Электроннолучевые трубки (рис. 22) — это чудесные приборы, которые помогают наблюдать электрические процессы. Они позволили создать современное телевидение, без них немыслима радиолокация, они широко применя-

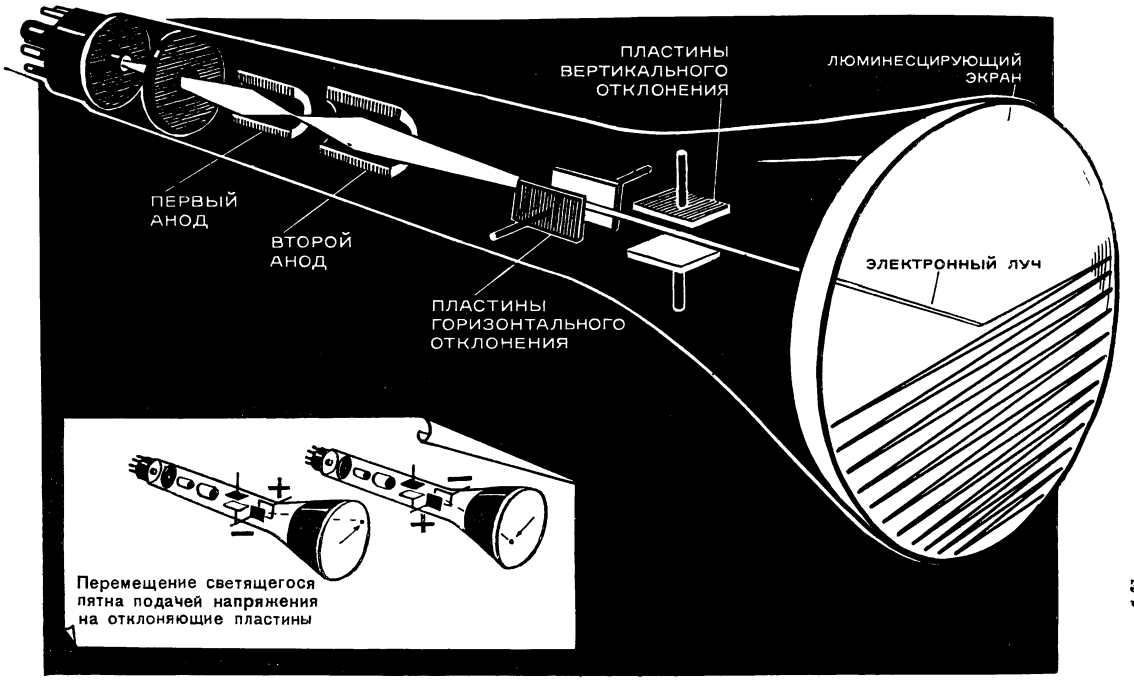



**Рис. 22. Электронолучевая трубка.**

ются в разнообразнейших приборах — от простейших лабораторных осциллографов до «блоков памяти» в современных электронно-вычислительных машинах.

**Электронная трубка** — это прибор, в котором электронный луч «рисует» световые изображения на специальном экране, обладающем способностью светиться в том месте, куда попадает поток электронов. Она имеет вид большого, обычно стеклянного (иногда металлического) конуса с почти плоским стеклянным дном. Диаметр дна может превышать 50 *см*. От вершины конуса отходит цилиндрическая трубка, горловина которой заканчивается обычным радиоламповым цоколем. Трубка герметически запаяна, воздух из нее выкачан.

В горловине трубки расположен катод, из которого, как и в любой радиолампе, вылетают электроны. Форма катода и другие конструктивные особенности трубки позволяют направлять практически все электроны в сторону экрана. Чтобы электроны могли «рисовать», их нужно собрать в тонкий острый луч. Эту операцию проделывают электронные линзы, которые так сжимают луч, что его диаметр у экрана не превышает долей миллиметра.

Перед фокусировкой, сразу же после вылета из катода, электроны пролетают через кольцевой управляющий электрод (своего рода радиоламповую сетку). От напряжения на нем зависит яркость светящейся точки на экране в том месте, куда попадает луч. Чем выше отрицательное напряжение на управляющем электроде, тем меньше интенсивность электронного потока и электроны ударяются об экран трубки с меньшей скоростью. А яркость свечения экрана зависит от силы их ударов.

Чтобы на экране появилось изображение, светящуюся точку нужно перемещать. Для этого применяются электростатические и электромагнитные отклоняющие системы. Они отклоняют луч и посылают его в любое место экрана.

Электростатическая система состоит из двух пар пластин, расположенных в горловине трубки. Каждая пара пластин отклоняет луч в одной плоскости: влево — вправо и вверх — вниз. Если на одну из пластин подать отрицательное напряжение, а на другую — положительное, то первая оттолкнет электронный луч, а вторая его притянет. В результате луч отклонится к положительной пластине и сместится на экране в соответствующую сторону. Если изменить знаки напряжения, луч отклонится в обратную сторону. Чем сильнее разность напряжений, тем быстрее отклоняется луч.

Так же действуют на луч электромагнитные системы. Они отклоняют элект-

ронный луч, воздействуя на него магнитным полем различной напряженности.

Экран покрыт особым веществом — **люминофором**; его свойства таковы, что он гаснет не сразу, а продолжает светиться несколько секунд и после того, как луч уже ушел. За это время луч успевает пробежать по экрану несколько тысяч раз, он почти непрерывно «подсвечивает» каждую точку и не дает погаснуть изображению.

Электроннолучевые трубки широко применяются при исследовании различных электрических явлений. Они позволяют видеть «форму» электрического напряжения и радиосигналов, изучать быстропеременные процессы. С их помощью можно наблюдать сигнал в любой точке радиоприемника или передатчика и очень точно настраивать радиоаппаратуру.

## КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЕ РАДИОУСТРОЙСТВА

Шла вторая мировая война. Фашистские самолеты бомбили города Англии. Радиолокационные станции на британском побережье обнаруживали вражеские самолеты и позволяли англичанам подготовиться к защите.

Постепенно было замечено, что радиолокаторам, которые работали на волнах метрового диапазона, мешают сильные помехи. Англичане предположили, что это противник «забивает» эфир помехами нового вида. Но после внимательных наблюдений обнаружилось, что помехи всегда появлялись рано утром, на заре, когда антенны смотрели в сторону восходящего солнца. Весь остальной день и всю ночь станции работали нормально. Следовательно, радиопомехи посылало Солнце.

Этот случай лишний раз подтвердил, что природа всех электромагнитных волн одинакова. Солнце излучает и свет и радиоволны в широком диапазоне частот. Из Вселенной к нам непрерывно идет поток радиоизлучений от звезд и туманностей, от скоплений межзвездного газа и других космических объектов.

Излучение электромагнитных волн заключено в самой природе вещества и энергии. Электромагнитную энергию частиц вещества изучает наука квантовая механика.

Каждый атом состоит из ядра и электронных оболочек — орбит, по которым вращаются электроны. Орбита электрона может проходить и близко от ядра и на сравнительно далеком от него расстоянии—это зависит от количества его энергии. Но у каждого атома есть свои определенные **«разрешенные» орбиты**, между которыми электроны находиться не могут: энергия электронов может меняться только скачками (см. статьи «Свет» и «Загадки твердого тела»).

В обычном, или, как говорят, невозбужденном, состоянии электрон занимает самый нижний энергетический уровень. Чем больше запас энергии, тем дальше от ядра вращается электрон. Ближняя к ядру орбита — самая устойчивая, и в возбужденном атоме электрон всегда стремится перебраться на нее. Но если электрон был на высоком уровне, то куда же денется избыток энергии, когда он перейдет на нижний уровень? Вот эта-то энергия и излучается в виде электромагнитной волны.

При переходе электрона с одного уровня на другой энергия выделяется вполне определенными порциями — квантами. Чем больше разница между энергетическими уровнями, чем больше энергия кванта, тем выше частота электромагнитного излучения. Таким образом, атомы, в которых много электронов и много «разрешенных» орбит, могут излучать электромагнитные волны самой различной длины, в том числе и радиоволны.

В окружающей нас природе происходят и другие квантовые процессы, которые сопровождаются излучением электромагнитной энергии. Изменение энергии колебаний атомов в пределах молекулы порождает инфракрасные лучи; изменение энергии во вращательном движении молекул создает еще более длинноволновые излучения, спектр которых в зависимости от вещества простирается до радиоволн сантиметрового диапазона. Свет, идущий от пламени спички, это результат многочисленных перемещений электронов, возбужденных тепловым воздействием горения.

Таким образом, атомы и молекулы излучают электромагнитные волны самых разных частот. Такое беспорядочное излучение нельзя использовать для радиопередач, так как модулирующий сигнал, несущий сообщение, может быть наложен лишь на волну какой-либо определенной, устойчивой частоты. Такие колебания называют монохроматическими, т. е. колебаниями одной частоты. Если спектр излучаемого сигнала шире, чем спектр модулирующих частот, то они затеряются среди многочисленных частот излучаемого сигнала и их нельзя будет выделить из него. Поэтому, чтобы использовать для целей радиотехники, скажем, свет, нужно создать генераторы монохроматического, или, как еще говорят, **когерентно-**

го, светового излучения. Иными словами, устройство должно излучать не просто световой луч, а луч только одной частоты, одной длины волны, например только красный (рис. 23).

Проникновение в микромир, глубокое изучение строения вещества и квантовых взаимодействий, разработка методов, как управлять поведением атомов и молекул,— все это позволило использовать сами атомы в качестве пере-

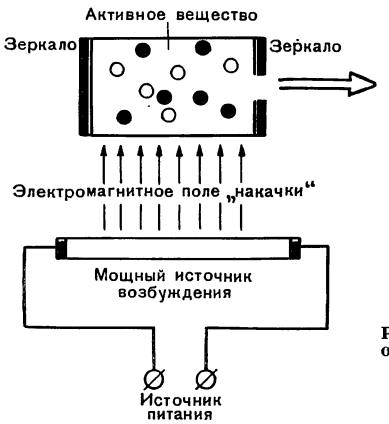



Рис. 23. Схема действия оптического генератора.

датчиков и приемников радиоволн. Этим занимается специальная отрасль радиотехники — квантовая электроника.

Одними из первых были применены в технике молекулярные усилители и генераторы. Были построены генераторы с небывалой стабильностью частоты. Это не удивительно, ведь в качестве колебательной системы использовались молекулы вещества, колебательные свойства которых практически не зависят от времени.

Современные квантовые генераторы теоретически позволяют, например, создать часы с такой точностью хода, что ошибка не превысит одну секунду за многие тысячи лет. Погрешность уже созданных атомных часов равна одной секунде за триста лет. Без таких сверхточных часов невозможны будут, например, космические полеты.

Огромную ценность для радиотехники представляют квантовые усилители радиочастотных колебаний. Они позволяют значительно увеличить чувствительность приемных устройств (до сих пор ее ограничивали собственные шумы приемного устройства). В этих усилителях атомы кристаллов, в которых происходит взаимодействие с квантами, подвергнуты глубокому охлаждению (см. ст. «На подступах к абсолютному нулю»). При температуре, близкой к абсолютному нулю, собственные шумы в сантиметровом диапазоне волн ничтожны. Это и позволяет принимать сигналы, в сотни раз более слабые, чем с помощью обычных радиоприемников (рис. 24).

Квантово-механические приборы помогают радиотехнике осваивать все более и более короткие волны. В одном из первых молекулярных генераторов использовались молекулы аммиака. Частота их собственных колебаний соответствует радиоволне длиной 1,25 *см*.

А сейчас квантовая электроника располагает устройствами, способными генерировать и усиливать радиоволны, длина которых доли микрона, т. е. генерировать и усиливать свет!

В обычных источниках света атомы возбуждаются (их электроны переводятся на более высокий энергетический уровень) за счет нагревания (в лампах накаливания) или за счет газового разряда (в газоразрядных лампах). Поскольку возбужденное состояние, как правило, неустойчиво, атомы излучают свет и возвращаются на первоначальный уровень, причем происходит это беспорядочно, неодновременно.

Колебания таких источников, как говорят, **некогерентны**.

Но переход электрона на нижний энергетический уровень можно вызвать, искусственно воздействуя внешней силой — электромагнитной волной. Подобно тому как резонансный контур откликается только на ту частоту, на которую он настроен, так и энергетический переход электрона в атоме может произвести только та электромагнитная волна, энергия

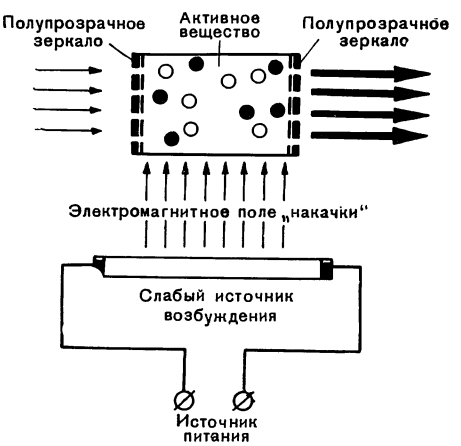



Рис. 24. Схема действия оптического усилителя.

кванта которой в точности соответствует разнице энергий между возможными энергетическими уровнями электрона.

Таким образом, если перевести атомы какого-либо вещества на верхний уровень и облучить их волной соответствующей длины, все атомы будут излучать согласованно, в такт с проходящей волной. Колебания источников излучения будут когерентными. Правда, нужно найти вещества, атомы которых длительное время могли бы находиться в возбужденном состоянии и не излучали бы самопроизвольно. Физики нашли такие вещества.

Один из наиболее распространенных квантово-механических приборов — генератор когерентного светового излучения. Он назван л а з е р о м.

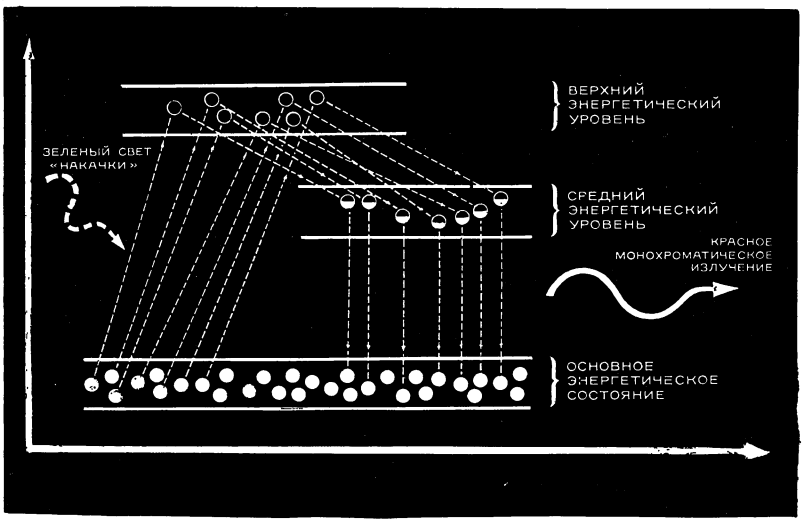



**Рис. 25. Схема энергетических уровней (зон) ионов хрома в рубине.**

Это название составлено из первых букв английских слов «усиление света за счет вынужденного излучения». Так же составлены названия и других квантово-механических приборов: м а з е р — генератор сантиметровых и миллиметровых радиоволн, и р а з е р — генератор инфракрасных лучей.

Основа лазера — кристалл искусственного рубина, внешним видом и размерами похожий на толстый карандаш. В качестве примеси в кристалл входят ионы хрома. При облучении обычным, некогерентным зеленым светом от мощного внешнего источника (его называют генератором «накачки») энергия как бы накачивается в кристалл (рис. 25) и беспорядочно переводит ионы хрома на верхний уровень. Они так же самопроизвольно и беспорядочно возвращаются, но не на нижний уровень, а на средний, теряя только часть приобретенной энергии. Здесь они могут удерживаться достаточно долго. А уже с этого уровня их может столкнуть на нижний уровень — одновременно, как по команде, — луч красного света.

Зеленый свет применяется для накачки лазера потому, что энергия его квантов соответствует энергии, необходимой для перевода ионов хрома с нижнего уровня на верхний. Переход со среднего уровня на нижний соответствует излучению красного света, поэтому только красный луч и может вызвать излучение возбужденных до среднего уровня атомов.

Полезная работа лазера состоит в том, что энергия луча, проходящего сквозь кристалл, увеличивается за счет излучения ионов, и из прибора луч выходит усиленным. Но лишь десятая доля процента, идущая от лампы-накачки, преобразуется в рубине в узкий пучок красного цвета.

Только узкая полоса частот соответствует зеленому свету, который переводит ионы хрома с нижнего энергетического уровня на верхний. Эта полоса так узка, что практически луч лазера монохроматичен, т. е. излучение идет на одной частоте. Сконцентрированные на среднем энергетическом уровне ионы скачком переходят на нижний уровень и излучают частоту, соответствующую разнице между энергиями нижнего и среднего уровней.

Излучение лазера импульсное, так как ионы не могут долго удерживаться на среднем уровне. Стоит нескольким из них перейти на нижний уровень, как появившийся красный луч начнет вызывать переходы других ионов.

Пройдя вдоль рубинового «карандаша», луч усилится сравнительно ненамного. Поэтому торцы кристалла покрывают серебром и полируют, превращая их в отражающие зеркала. Отражаясь от них, луч многократно пройдет из конца в конец по кристаллу, соберет энергию со всех возбужденных ионов и выйдет через узкое отверстие, оставленное в одном из посеребренных концов, т. е. выстрелит красным лучом. Весь этот процесс длится тысячные доли секунды.

В последнее время появились и лазеры непрерывного действия. Они работают как усилители света.

К описанному остается добавить, что гене-

ратор «накачки» обычно представляет собой газоразрядную лампу, стеклянная трубка которой спирально обвивает кристалл рубина. Кроме того, прибор оборудован сложной системой охлаждения, оптическими устройствами и т. п. (см. рис. 17 на стр. 181).

Значительные возможности генераторов света, микроволн и инфракрасных лучей обусловливают две физические особенности.

Во-первых, когерентность, монохроматичность излучения. Это свойство позволяет накладывать на сигнал генератора модуляцию любого вида, что особенно важно для связи.

Во-вторых, передача электромагнитных колебаний, длина волны которых ничтожна по сравнению с радиоволнами, применяемыми в радиотехнике. Короткая волна обеспечивает высокую направленность излучения, которая тем выше, чем больше отношение диаметра антенны к длине волны.

Так, например, антенна (прозрачный торец рубинового кристалла) диаметром в 10 *мм* при длине волны в 0,7 *мк* имеет такую же направленность, как и антенна диаметром в 1,5 *км* при длине волны в 10 *см*.

Не удивительно, что луч, выходящий из рубина, почти не расходится. Уже существующие лазеры могут высветить на Луне пятно диаметром всего в несколько километров! Это особенно важно для космической связи с ее огромными расстояниями: потери энергии будут сравнительно небольшими. (См. ст. «Разговор с планетами по радио».)

Особенно интересны перспективы применения лазеров и мазеров на космических ракетах. В космосе можно обойтись без источников тока для накачки генераторов. Здесь всегда есть даровая энергия. В лучах Солнца есть и зеленые лучи; сфокусировав их на кристалле с помощью линз и зеркал, можно обеспечить генераторы и усилители нужной им энергией в любом количестве.

Как именно можно применить оптические частоты в радиотехнике, еще далеко не полностью ясно. Но перспективы, открывшиеся уже сейчас, сулят этой области науки и техники грандиозное будущее. Ученые уже говорят и о создании малошумящих усилителей, и об «атомных» стандартах частоты, и об очередной проверке теории относительности, и о космической связи на расстоянии, измеряемом световыми годами, и о радиолокации с высочайшей разрешающей способностью, т. е. практически о «радиовидении», и о наземных и космических радиолиниях с немыслимой ранее емкостью каналов. Впереди также применение квантово-механических приборов в вычислительных машинах, в управлении химическими реакциями и биологическими процессами, в исследованиях веществ под воздействием чрезвычайно концентрированных потоков световой энергии, плотность которых приближается к плотности энергии в дуге при электросварке.

■

# РАЗГОВОР С ПЛАНЕТАМИ ПО РАДИО

1962 год ознаменовался в истории событием особой важности. 29 декабря в газете «Правда» было помещено информационное сообщение:

«...Советским ученым впервые в истории человечества 19 и 24 ноября 1962 г. удалось осуществить радиосвязь через планету Венера. Переданное с Земли телеграфным кодом 19 ноября слово **МИР** достигло планеты Венера, отразилось от нее и, пройдя общее расстояние 81 миллион 745 тысяч километров, через 4 минуты 32,7 секунды было принято на Земле.

Этим же методом 24 ноября на Венеру были переданы слова **ЛЕНИН** и **СССР**. Отразившись от поверхности планеты, через 4 минуты 44,7 секунды эти слова были приняты на Земле. Они прошли в космосе 85 миллионов 360 тысяч километров!»

## ДЛЯ ЧЕГО БЫЛ НУЖЕН «РАЗГОВОР» С ПЛАНЕТАМИ?

Эпоха космических полетов выдвигает перед наукой все новые и новые задачи, не решив их, немыслимо дальше развивать исследования солнечной системы.

Космический корабль, отправляясь к какой-либо планете, должен быть обеспечен надежной радиосвязью с Землей: ведь с него нужно передавать информацию о полете, результаты научных исследований, сведения о самочувствии экипажа корабля. Космонавтам, высадившимся на планету, также будет необходима радиосвязь с Землей.

Чтобы правильно рассчитать траекторию, по которой полетит космический корабль, надо очень точно

знать расстояния до планет. Эти расстояния измеряются особой мерой длины — **Астрономической единицей** (АЕ). Она равна среднему расстоянию от Солнца до Земли. Орбиты планет, выраженные в АЕ, определены очень точно, но точность самой АЕ была недостаточна, чтобы рассчитать маршрут космического корабля к планете, удаленной от Земли на многие миллионы километров. Действительно, если величина АЕ определена с ошибкой всего лишь в 0,1%, то корабль, пройдя 100 млн. *км*, может оказаться в 100 тыс. *км* от намеченной цели и посадка на эту планету станет невозможной.

Кроме того, посадка на планету может быть безопасной только в том случае, если хорошо известны температура поверхности планеты, продолжительность суток на ней, ее рельеф, состав атмосферы и многое другое. Обо всем этом можно узнать, «поговорив» с планетой (проведя радиолокацию планеты). Из «разговора» можно точно определить расстояние от Земли до планеты, а следовательно, и точную величину АЕ. «Разговор» с планетой подтвердит и возможность радиосвязи на миллионы километров.

## ПЛАНЕТНЫЙ РАДИОЛОКАТОР

Наверное, каждый слышал о радиолокаторах, которые позволяют отыскивать самолет в густых облаках, обеспечивают безопасное вождение гигантских морских судов даже в плотном тумане, помогают летчику управлять самолетом в облаках и ночью. Радиолокацию применяют и метеорологи: с ее помощью они следят за движением гроз и штормов. Можно было бы назвать и много других применений радиолокации. В последние годы радиолокация получила и космическую специальность: она применяется для исследования Вселенной.

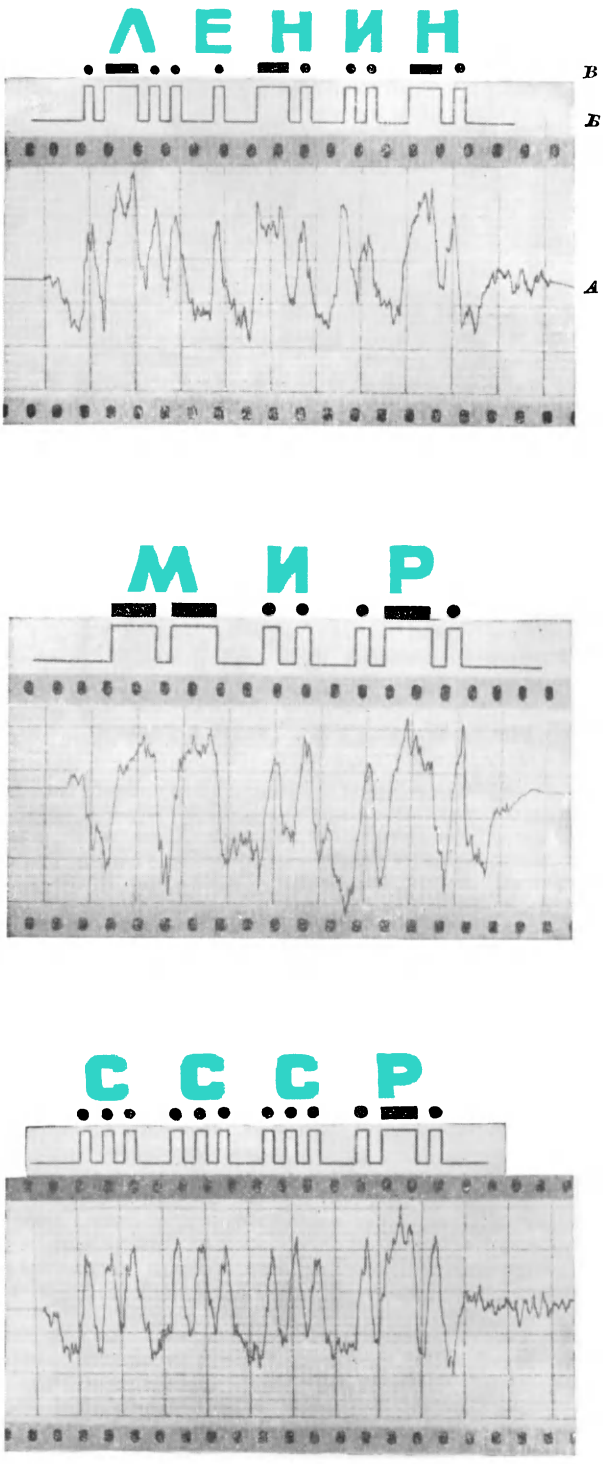
Космическая радиолокация совсем еще молодая наука. Ее основной прибор — **планетный локатор:** это гигантское сооружение. О его величине и сложности можно судить хотя бы по тому, что во всех его узлах количество электронных ламп и полупроводниковых приборов выражается... пятизначным числом.

От своих собратьев, применяемых для наземных целей, планетный локатор отличается сильным голосом (мощностью луча) и удивительно тонким слухом (высокой чувствительностью).

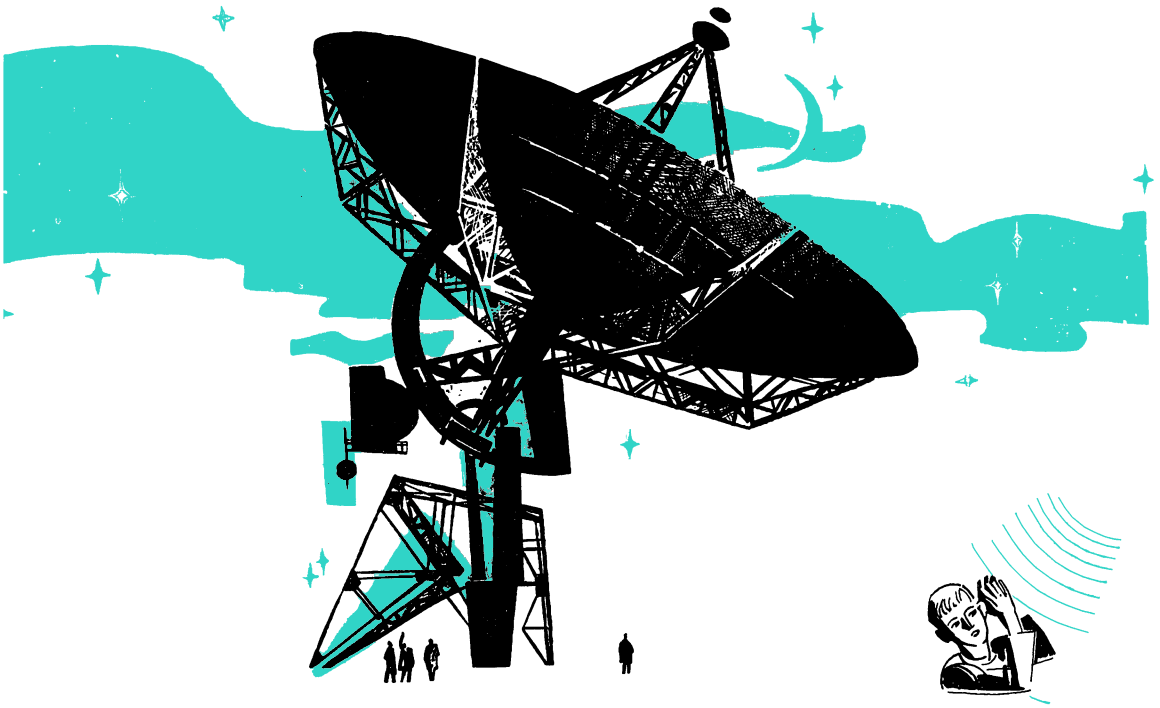
Это сооружение включает в себя мощные передатчики, сложнейшие антенные устройства, высокочувствительные приемники и тончайшую регистрирующую и управляющую аппаратуру.

Радиолокационный метод исследований космического пространства позволяет решить многие научные проблемы, недоступные другим методам. Оптический и радиоастрономический методы пассивны. Они позволяют наблюдать и регистрировать лишь отраженный от планеты солнечный свет и лишь собственное радиоизлучение планеты.

Космическая радиолокация — метод активный. Его сущность в том, что в сторону планеты посылают радиоволны, которые, отразившись от ее поверхности, возвращаются на Землю и улавливаются локатором. По этим отраженным сигналам можно определить расстояние до планеты, скорость ее движения, период вращения, физические свойства поверхности и т. д.




**Запись сигналов, отраженных поверхностью Венеры; *А*—прямая запись на кинопленке, *Б* — изображение прямой записи в виде чередующихся импульсов, *В* — та же запись азбукой Морзе.**



## «ГОЛОС» И «СЛУХ» ЛОКАТОРА

Колебания высокостабильного кварцевого генератора с помощью системы преобразования и умножения частот доводятся до частоты порядка 700 млн. *гц*, проходят через мощные усилители, а затем уже излучаются антенной. Мощность этого радиолуча чрезвычайно велика, достаточно сказать, что на единицу телесного угла (на один стерадиан) приходится энергии около 250 млн. *вт*.

Небесные тела находятся в беспрерывном движении. Расстояние между Землей и исследуемой планетой либо сокращается, либо увеличивается; из-за эффекта Доплера (см. стр.189) частота отраженного от планеты сигнала может отличаться от частоты излученного сигнала на несколько десятков герц; кроме того, в течение сеанса связи может несколько изменяться и частота излучаемого сигнала. Поэтому в планетном радиолокаторе есть специальное устройство, вводящее поправку на доплеровское смещение частоты. Без этого устройства невозможно было бы выделить отраженный сигнал; оно действует автоматически с очень высокой точностью по заранее составленной программе.

Отраженный от планеты сигнал улавливается антенной и, усиленный парамагнитным и параметрическим усилителями, поступает в супергетеродинный приемник. Там сигнал преобразуется до звуковой частоты, а затем записывается магнитофоном. Анализ записанного сигнала проводится на специальном анализаторе спектра, который позволяет выделить полезный сигнал из различных шумов.

Приведем расчет, который позволит понять, как сложно «разговаривать» с планетами. Диаметр Венеры — 12 400 *км*. Наименьшее расстояние, на которое она сближается с Землей,— 39 млн. *км*. В это время Венера видна с Земли в телесном угле $8 \cdot 10^{-8}$ стерадиан. Если радиолокатор излучает до 250 млн. *вт* на стерадиан, то на всю видимую поверхность Венеры приходится лишь около 20 *вт*, из них большая часть энергии поглотится поверхностью планеты. Примем для нашего расчета, что отразится 15% энергии, т. е. около 3 *вт*. Но, конечно, не вся отраженная от Венеры энергия дойдет до Земли. На всю поверхность Земли приходится лишь около $4 \cdot 10^{-8}$ *вт* энергии, а на 1 $м^2$ земной поверхности — $1{,}6 \cdot 10^{-22}$ *вт*. Чтобы «услышать» такой чрезвычайно слабый сигнал, планетный локатор должен обладать поистине фантастически чутким слухом.

Высокочувствительные приемники локатора позволяют регистрировать и более слабые сигналы, в которых на 1 $м^2$ приходится энергии около $1{,}6 \cdot 10^{-24}$ *вт*.

Этот расчет показывает, как велики успехи в технике передачи и обнаружения радиосигналов. **Стало возможным проводить радиосвязь с планетами, удаленными на миллионы километров!** А ведь всего лишь 60 лет назад была впервые осуществлена радиосвязь. 24 марта 1896 г. А. С. Попов продемонстрировал передачу и прием по радио телеграфного текста на расстояние около 250 *м*.

## «РАЗГОВОРУ» МЕШАЕТ ВСЕЛЕННАЯ!

Так как сигнал, улавливаемый планетным локатором, чрезвычайно слаб, его регистрация в сильной степени зависит от уровня шумов. У каждого приемника есть свои, так сказать, внутренние шумы. Они возникают во всех элементах его схемы: в контурах и сопротивлениях, в линиях передачи из антенны, в электронных лампах и полупроводниковых приборах.

Эти шумы возникают от многих причин: от теплового движения электронов в проводниках, от того, что в лампах ток эмиссии катодов непостоянен, от тепловых беспорядочных колебаний токов в полупроводниковых приборах.

Наибольшую часть внутренних шумов дают в приемнике первые каскады усиления: их шумы усиливаются всеми последующими каскадами. Поэтому в планетном локаторе перед входом в приемник установлен малошумящий **парамагнитный усилитель,** охлаждаемый жидким гелием до температуры 4°К. Парамагнитные усилители значительно повышают уровень сигнала и практически не добавляют шумов, при этом бóльшую роль играют внешние шумы, принимаемые антенной от внеземных (космических) источников и из атмосферы.

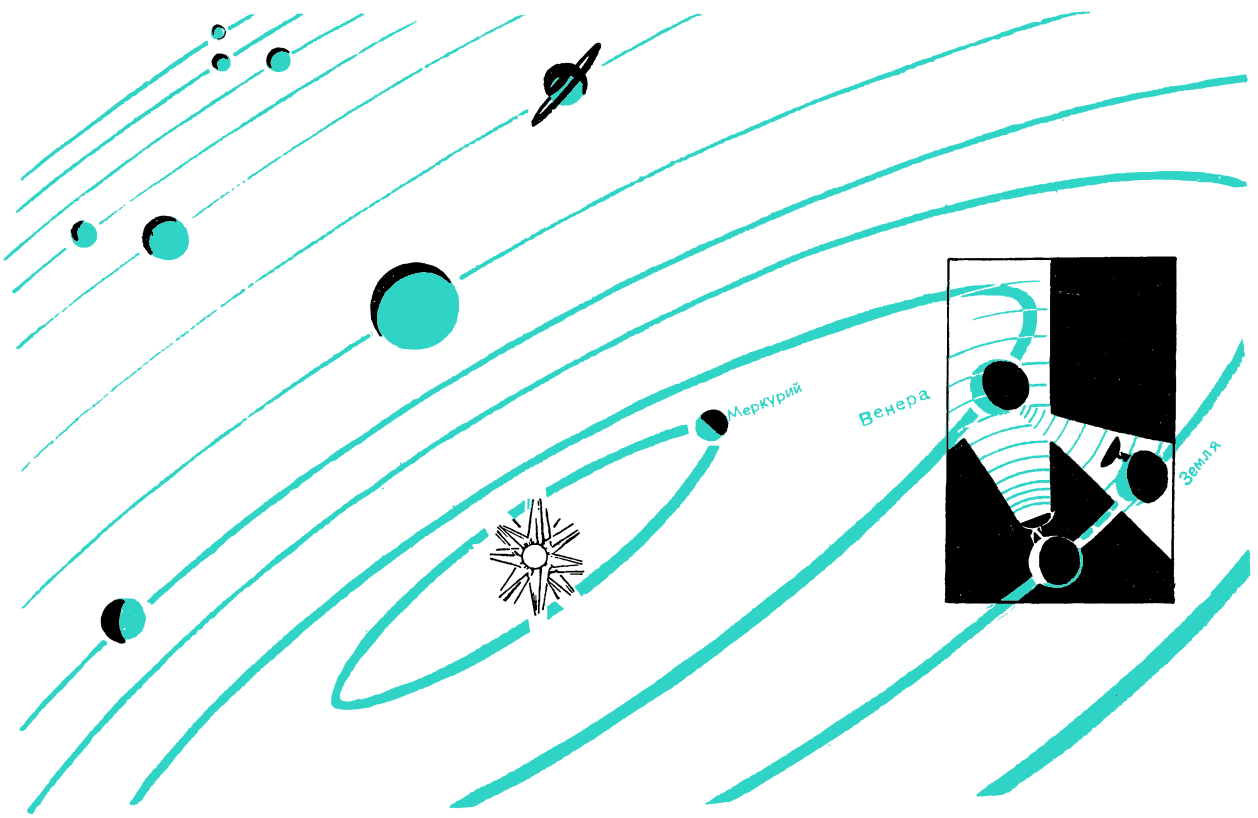
Атмосферные шумы обусловлены тепловым движением зарядов и заряженных частиц в атмосфере: любое движение зарядов порождает электромагнитное поле, и это поле воспринимается приемником как радиопомеха.

Все основные внеземные источники радиопомех в настоящее время известны. Их природа различна. Так, например, солнечные радиошумы создаются движением электрических зарядов в хромосфере и в короне Солнца. Радиоизлучение Солнца в значительной степени зависит от его активности и от времени суток. В периоды повышенной активности Солнца его радиоизлучение может вырасти во много раз по сравнению с излучением спокойного Солнца. Сами планеты тоже сравнительно мощные источники радиоизлучений, именно на этом основан радиоастрономический метод измерения температуры планет и звезд.

Даже космическое пространство создает радиошум. Он происходит потому, что межзвездный водород постоянно изменяет свое энергетическое состояние, в нем совершаются квантовые переходы (см. стр. 191 и 350). Чувствительные радиоприемники воспринимают этот шум как постоянный фон.

Радиосигнал, уловленный приемником, состоит из отраженных планетой радиоволн и шумов; в течение нескольких сеансов он записывается на магнитную ленту и пропускается через 20-канальный анализатор — полезный сигнал выделяется из общего спектра радиоколебаний методом фильтрации и накопления. Сущность метода накопления в том, что через анализатор пропускают записи нескольких сеансов радиосвязи. Полезный сигнал присутствует в каждой такой записи, и он — один и тот же. А шумы происходят от случайных процессов: они различны, и каждый из шумов присутствует не во всех сеансах радиосвязи. «Прослушав» магнитную запись нескольких сеансов, анализатор усиливает полезный радиосигнал, выделяя его из неусиленных шумов.

Телеграфная радиосвязь через Венеру 19 и 24 ноября 1962 г. была возможной потому, что отраженный сигнал превышал уровень шумов в несколько раз. На рисунках, помещенных на странице 243, видно, что прямая запись отраженного от планеты сигнала достаточно хорошо повторяет сигнал, посланный к планете.



## РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ «РАЗГОВОРАХ» С ПЛАНЕТАМИ

С помощью радиолокации планет была уточнена Астрономическая единица. Локацией Венеры в 1961 г. установлено, что Астрономическая единица равна 149 599 300 *км*. Возможность ошибки не превышала ±2000 *км*. Повторная радиолокация Венеры в 1962 г. позволила уменьшить эту неопределенность и уточнить значение **Астрономической единицы:** оно оказалось **149 598 100 ± 750 км.** Выяснилось, что до локации 1961 г. величина АЕ была известна с точностью 0,1%. Мы уже говорили, что такая точность недостаточна для вождения космических кораблей.

При локации Венеры был определен коэффициент отражения от поверхности этой планеты. Он оказался 12—18%. Это означает, что на поверхности Венеры есть твердые породы, близкие по свойствам к скальным породам Земли.

В июне 1962 г. была проведена радиолокация Меркурия. Она подтвердила значение АЕ, полученное при локации Венеры. Коэффициент отражения Меркурия равен 3—7%. Годом позже такая же локация была проведена из США. В феврале 1963 г. установлена из СССР радиолокационная связь с Марсом. В это время Марс находился от Земли в 100 млн. *км*. Коэффициент отражения оказался меньше, чем у Венеры, но временами достигал 15%. Радиолокационные данные показывают, что на Марсе есть ровные горизонтальные участки размером более километра.

Дальнейшее усовершенствование планетного локатора позволило в сентябре — октябре 1963 г. провести локацию планеты Юпитер — самой большой планеты солнечной системы. Юпитер в этот период находился в 600 млн. *км* от Земли. **Радиоволны, посланные к Юпитеру, возвращались на Землю через 1 час 6 минут, пройдя 1 млрд. 200 млн. км.** Коэффициент отражения поверхности Юпитера более 10%. Эксперимент показал, что радиосвязь возможна и на расстоянии в несколько сот миллионов километров.

Все эти исследования имеют большое значение в освоении космического пространства. Недалек тот день, когда космический корабль, покинув Землю, устремится по точно рассчитанному маршруту к одной из планет солнечной системы. Космонавты будут вооружены всем необходимым, чтобы поддерживать связь с Землей.

Экспериментальная радиосвязь через Венеру впервые в мире произведена в Советском Союзе. Она доказала возможность надежной радиосвязи с далеко удаленными от Земли планетами и космическими кораблями. И символично, что первое государство рабочих и крестьян послало в космос и приняло обратно самые понятные и близкие всем людям слова, с которыми человечество связывает свои надежды на прекрасное будущее: **«МИР», «ЛЕНИН», «СССР».**

■

# ПОЛУПРОВОДНИКИ

В современной технике много чудес, о которых совсем недавно можно было только мечтать. Представьте себе радиоприемник, который спрятан в пилюле, похожей на лекарственную. Ее можно проглотить, и пойдут радиосигналы прямо из желудка, они расскажут врачам о состоянии внутренних органов больного.

Приборы космического корабля питаются электрическим током от маленьких темных пластинок, сложенных в виде щита. Солнечный свет падает на пластинки и превращается в электрическую энергию.

Существует устройство, которое зимой обогревает дом за счет мороза, а летом охлаждает его за счет уличной жары. Созданы термометры величиной с булавочную головку, холодильники не больше наперстка и многие другие удивительные и полезные приборы.

Во всех этих приборах действуют полупроводниковые материалы.

Полупроводники широко и многообразно применяются в современной технике. К ним относится много веществ: кристаллы германия, кремния, селена, углерода, разнообразные сплавы и окислы. Есть полупроводники стекловидные и даже жидкие.

Наука о полупроводниках появилась совсем недавно. И сейчас во всем мире исследуются их свойства. В нашей стране этой проблемой занимаются многочисленные коллективы специалистов, в том числе целая школа ученых, созданная крупнейшим советским физиком академиком А. Ф. Иоффе.

## ПРОВОДНИКИ И ИЗОЛЯТОРЫ

Медная проволока хорошо проводит электрический ток. Поэтому медь, как и другие металлы, называют проводником. А фарфоровый ролик или какой-нибудь предмет из резины, эбонита не пропускают ток. Это — изоляторы.

Любое вещество построено из очень большого количества атомов. А в каждом атоме есть сравнительно массивное, положительно заряженное ядро, вокруг которого кружатся электроны — легкие частицы, несущие отрицательный заряд. И вот оказывается, что

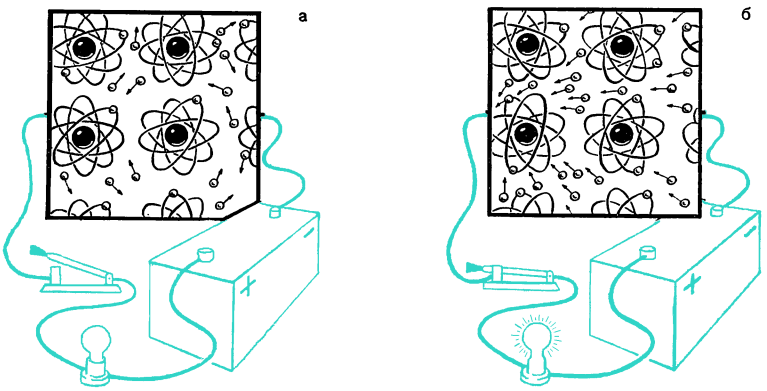



Рис. 1. Электроны в проводнике: *а* — «свободные» электроны образуют в металле электронный газ, *б* — под действием электрического поля электроны двигаются к положительному полюсу — течет ток.

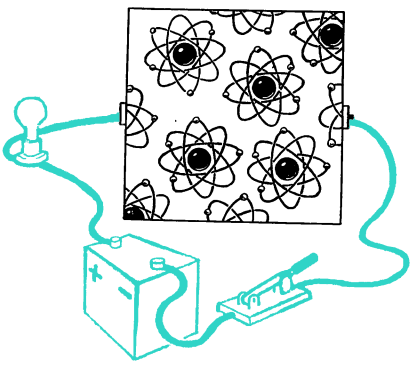


Рис. 2. В изоляторе нет электронного газа. Все электроны связаны в атомах, и электрическое поле не может создать ток.

наружные, так называемые валентные электроны атомов (те самые, что создают химические связи) ведут себя в проводниках иначе, чем в изоляторах.

В металле валентные электроны не удерживаются у атомов, соскакивают с них и свободно блуждают, образуя внутри металла своеобразный электронный газ. Правда, частицы этого газа — электроны — не могут уйти из металла. Общее притяжение положительно заряженных ядер надежно удерживает электронный газ внутри металлического предмета. Можно считать, что валентные электроны там обобществлены: принадлежат сразу всем атомам вместе, а не каждому из них в отдельности.

Стоит прижать металлическую проволочку к полюсам электрической батареи, как частички электронного газа подхватываются электрическим полем и устремляются к положительному полюсу. По металлу начинает течь электрический ток (рис. 1).

Из школьных опытов читатель, вероятно, помнит, что при нагревании проводника его электропроводность падает. Спираль электрической плитки сразу после включения в сеть обладает значительно меньшим сопротивлением, чем когда докрасна раскалится. Как это можно объяснить?

Электронный поток в металле пробивается через кристаллическую решетку атомов, лишенных внешних электронов. Но ведь атомы не стоят неподвижно. Чем выше температура, тем сильнее колеблется решетка. И электронному потоку все труднее пробиваться сквозь нее, ибо раскачивающиеся из стороны в сторону атомы сбивают электроны с пути.

В фарфоре, как и в любом другом изоляторе, дело обстоит иначе. Электронного газа там нет, атомы крепко удерживают свои внешние электроны (рис. 2). В изоляторе нечему переносить ток. Правда, если очень сильно разогреть изолятор, его иногда все же можно сделать электропроводным: при интенсивном тепловом движении атомы начнут терять валентные электроны, которые и станут носителями тока. На этом принципе, кстати сказать, устроены «градусники», измеряющие очень высокую температуру (выше тысячи градусов).

## ЭЛЕКТРОНЫ В ПОЛУПРОВОДНИКЕ

Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и изоляторами. При низкой температуре большинство внешних электронов в полупроводнике «сидит» в атомах на своих местах. Но связаны они с атомами слабее, чем в изоляторе. Участвуя в тепловом движении, атомы раскачиваются и теряют наружные электроны. При нагревании полупроводника в нем увеличивается количество электронного газа, т. е. свободных электронов, способных переносить электрический ток.

Значит, полупроводник при нагревании не уменьшает, как металл, а, наоборот, увеличивает свою электропроводность (рис. 3). В этом заключается важный физический признак любого полупроводникового материала.

Характерна и другая особенность. Оказывается, в полупроводнике переносят ток не только оторвавшиеся от атомов электроны, но и электроны, которые сравнительно слабо свя-

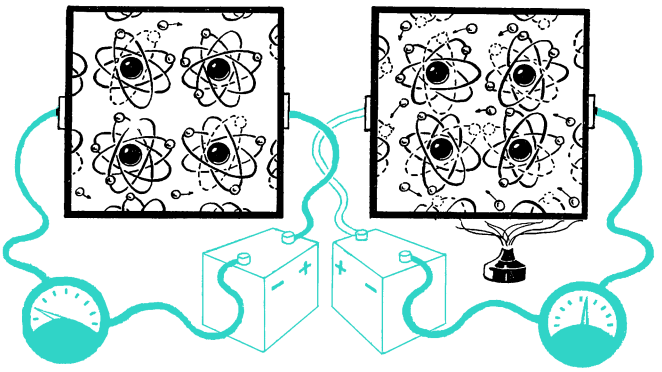


Рис. 3. В полупроводнике электроны могут срываться с внешних оболочек атомов и занимать места на внешних оболочках других атомов. При нагревании полупроводника такой процесс становится интенсивнее, и электропроводность полупроводника увеличивается.

заны с атомами и могут освобождаться под действием тепловых колебаний или под действием электрического поля.

В куске полупроводника, соединенном с полюсами электрической батареи, атомы кристаллической решетки колеблются. Электроны с них срываются, тотчас подхватываются электрическим полем и летят к положительному полюсу. Но в каждом атоме, избавившемся от электрона, остается как бы «свободное место». Оно остается пустым лишь ничтожное мгновение. Под действием электрического поля на него сразу же переходит электрон с соседнего атома. Не получая полную свободу, такой электрон просто «меняет хозяина»; он стремится при этом двигаться туда, куда его влечет электрическое поле батареи. Но, «скакнув» на освободившееся место, электрон-«перебежчик» освобождает место, на котором был раньше. Туда тоже устремляется электрон с более далекого атома. На место этого электрона «соскакивает» с соседнего атома следующий электрон и т. д. Словом, стремясь к положительному полюсу батареи, электроны как бы «скачут» по атомам. Это создает значительную добавку к обычному электронному току, текущему через полупроводник. Такая добавка называется «дырочным» током. А «свободные места», по которым «прыгают» в атомах связанные электроны, физики именуют «дырками».

## «ДЫРКИ»

Вот сравнение, которое поможет лучше уяснить, в чем сущность понятия «дырки». В театре сидит публика. Зал заполнен до отказа. Но вот кто-то, сидящий с краю на первом ряду, уходит, оставляя пустой стул. Это и есть дырка. На освободившееся место тотчас пересаживается зритель из второго ряда, оставляя пустой стул (дырку) уже во втором ряду. Снова пересадка — и свободное место (дырка) перекочевала в третий ряд. Так, зрители один за другим передвигаются к сцене, а пустое место тем временем отодвигается назад (рис. 4).

В полупроводнике дырка ведет себя подобно пустому месту в театральном зале. Когда по полупроводнику течет ток, электроны и дырки бегут в противоположных направлениях.

И вот что существенно: дырки движутся к отрицательному полюсу, т. е. как частички, несущие положительный электрический заряд. Закономерности движения дырок таковы, что этим «пустым местам» физики условно приписывают и заряд (равный заряду электрона, но

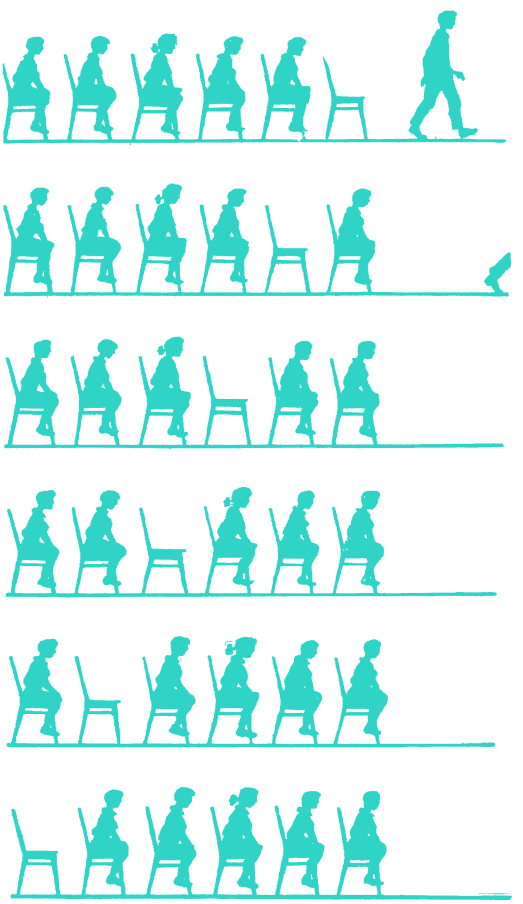


Рис. 4. Электроны в полупроводнике — как зрители в театральном зале; пересаживаясь со стула на стул поближе к сцене, они перемещаются в одну сторону. А дырки, как освободившиеся места, движутся в другую сторону.

положительный), и «эффективную массу»: принимают для удобства расчетов, что дырки обладают определенной массой (немного большей, чем у электронов, потому что дырки не так подвижны, как электроны).

Выходит, что поведение дырки во всем подобно поведению материальной частицы с самым маленьким в природе положительным зарядом. Принято считать, что эта «частица», как и свободный электрон, служит в полупроводнике носителем электрического тока. Разумеется, надо помнить, что дырка понятие чисто условное. Это совсем не настоящая частица. На самом деле в ней нет ни заряда, ни массы. Пользуются понятием «дырки» лишь ради удобства, чтобы избежать сложных и громоздких рассуждений.

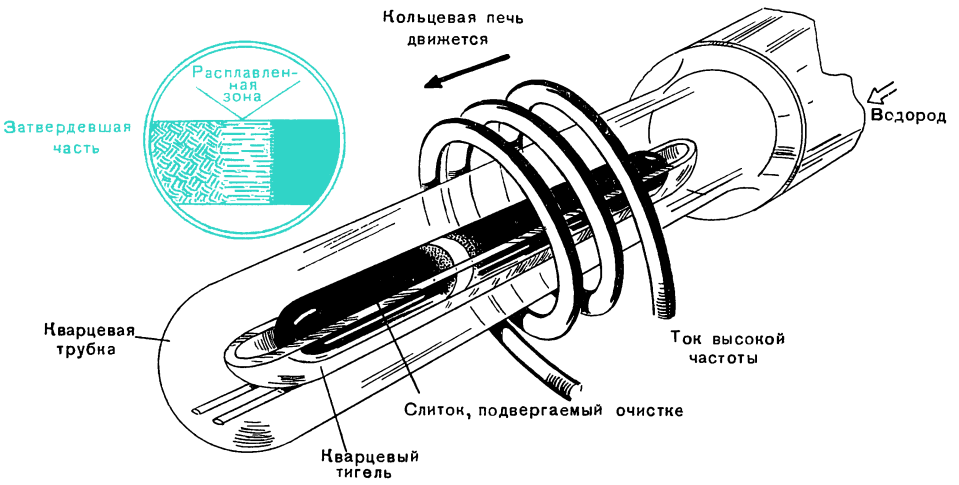



**Рис. 5. Схема установки для очистки германия зонной плавкой.**

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Стоит ввести в чистый полупроводник совсем небольшое количество другого химического элемента, как появляется либо избыток электронов, либо избыток дырок. Например, закись меди обогащается электронами, если меди в ней больше «нормы», если же в ней есть «лишний» кислород — дырками. Происходит это потому, что атомы кислорода оттягивают на себя электроны и создают избыток дырок, а атомы меди, наоборот, отдают свои электроны, создавая избыток электронного газа. Те полупроводники, в которых основные носители тока— электроны, называются электронными. А материалы с избытком дырок именуются дырочными полупроводниками.

Изготовить полупроводник — дело очень нелегкое. Главная трудность — в очистке материалов. Например, полупроводниковый кристаллический германий надо так очистить, чтобы **на миллион его атомов приходилось не более одного атома примесей.** Еще большей чистоты требуют физики от кремния: на миллиард атомов не больше одного чужого! Современная техника справляется с такой очисткой материалов. Для этого применяют разные методы.

Химики давно подметили, что кристалл всегда чище жидкости (раствора или расплава), из которой он выращен. Ведь в кристаллическую решетку встраиваются без помехи только атомы, принадлежащие веществу кристалла. Для других атомов в кристалле нет «подходящего места», и если они иногда «принимаются в строй», то лишь в виде исключения. Поэтому, например, лёд на поверхности моря менее соленый, чем морская вода.

Следовательно, чтобы очистить полупроводник, можно сначала расплавить его, а затем вырастить из расплава кристалл. Если эту операцию повторить многократно, с каждым разом кристаллы будут получаться все чище и чище. Такое выращивание кристалла — дело совсем не простое. Посуда для расплава должна быть жаростойкой и идеально чистой. На всем протяжении процесса должны быть обеспечены определенные, строго регулируемые условия. Кристаллизация — капризный процесс, и управлять ею нужно с исключительной аккуратностью.

Германий до кристаллизации подвергают так называемой зонной плавке (рис. 5). Длинный германиевый слиток, положенный в графитовую лодочку, помещают в кварцевую трубку, из которой удален воздух (или заменен инертным газом). Трубку охватывает кольцевая высокочастотная электропечь, которая в каждый момент воздействует на сравнительно узкий участок слитка. Включается ток, высокочастотное поле расплавляет полупроводник. В твердом

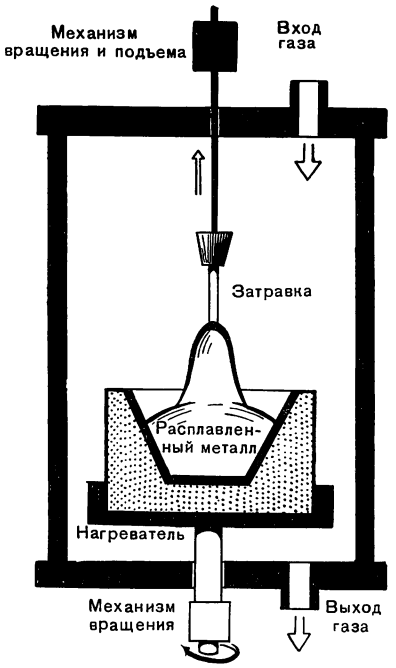



**Рис. 6. Установка для вытягивания монокристаллов германия из расплава.**

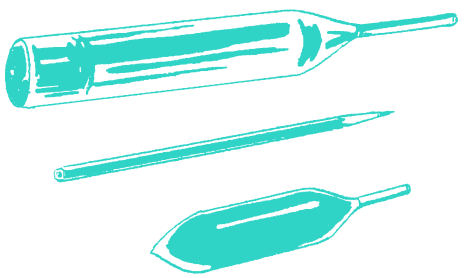


**Рис. 7. Слитки германия (верхний) и кремния (нижний), полученные выращиванием кристалла. Величиной они сравнимы с карандашом.**

слитке получается жидкая перемычка. Кольцевая электропечь медленно (несколько сантиметров в час) продвигается вдоль трубки. Вместе с ней движется в слитке и расплавленная зона. Позади этой зоны, в затвердевающей части слитка, германий оказывается очищенным, потому что примеси переходят в зону расплава. Так эти примеси отгоняются к другому концу слитка.

Зонная плавка, даже повторенная много раз, еще не обеспечивает нужную чистоту полупроводника. Германий надо подвергнуть кристаллизации в атмосфере очищенного водорода. Слиток, полученный после зонной плавки, расплавляют на этот раз целиком в идеально чистом тигле. В расплав опускают затравку — крошечный кусочек очень чистого германиевого кристалла (рис. 6). Затравку медленно поднимают и на ней «намерзают» слои очищенного полупроводника. При этом затравка плавно поворачивается вокруг своей оси, а тигель так же плавно поворачивается в другую сторону. Поэтому выращенный кристалл приобретает правильную цилиндрическую форму (рис. 7), и в нем равномерно распределены оставшиеся еще в германии примеси. Скорость кристаллизации (вытягивание затравки и ее вращение) регулируется очень тщательно — этим тоже достигается равномерность очистки. Так же как и зонная плавка, кристаллизация проводится несколько раз.

Еще труднее очистить кремний. Графитовые тигли для этого непригодны: они недостаточно жаростойки (температура плавления у чистого кремния примерно 1400°Ц). Пользуются сверхчистыми кварцевыми тиглями или вовсе обходятся без тиглей: в вертикально укрепленном слитке ведут так называемую бестигельную зонную плавку (рис. 8) — перекристаллизацию «на весу». А это очень трудный и тонкий процесс.

В многократно очищенный материал добавляют уже другие, но нужные примеси. Так получают полупроводники с самыми разнообразными свойствами и назначениями. Ничтожные добавки различных веществ превращают электронный полупроводник в дырочный, и наоборот. Тем же способом можно в сотни, в тысячи раз изменять электропроводность этих материалов и регулировать другие их свойства.

## ТЕРМИСТОРЫ

Самая простая особенность полупроводника — ярко выраженная зависимость его электропроводимости от температуры. Чем сильнее нагрет полупроводниковый материал, тем обильнее в нем освобождаются электроны и образуются дырки, тем лучше он проводит ток. Поэтому из полупроводников делают простые и надежные электротермометры. Их называют термосопротивлениями или термисторами (рис. 9).

Каких только термисторов сейчас не встретишь на наших заводах, в научно-исследовательских институтах, в больницах и даже в колхозах! Есть, например, многометровые штанги, которыми удобно проверять температуру где-нибудь в глубине наполненного зерном элеватора. Есть термисторы, похожие на кин-

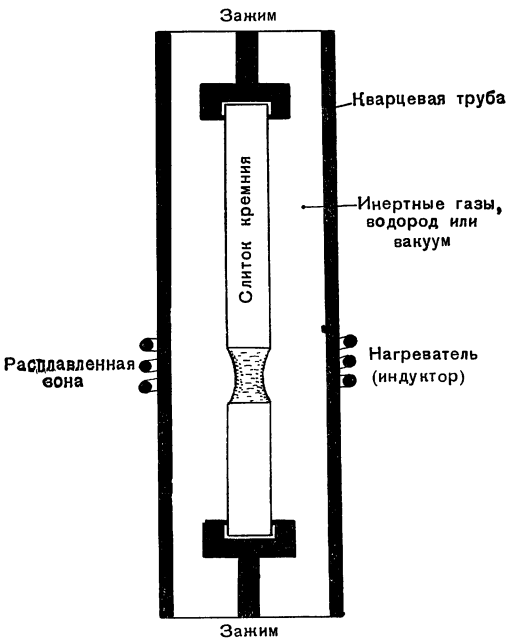



**Рис. 8. Схема установки для бестигельной зонной очистки кремния.**

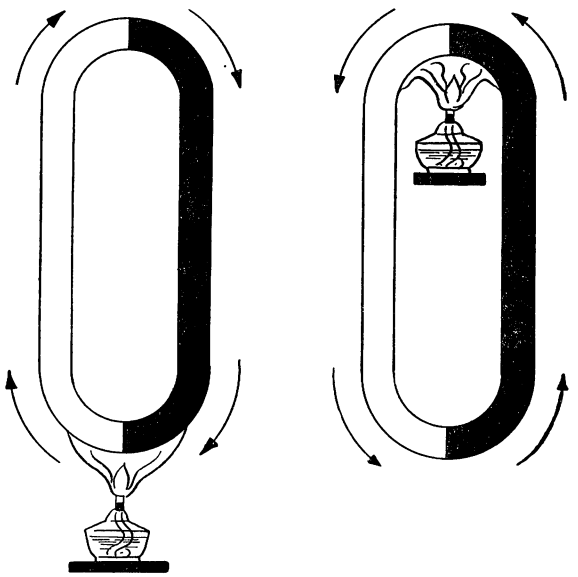


**Рис. 9. Термистор действует так же, как и обычная термопара, т. е. спай двух полосок из различных металлов. При нагреве стыка полосок возникает ток. Его направление зависит от того, какой из стыков нагревается.**

жалы. Их втыкают в почву, чтобы узнать, насколько нагреты разные ее слои. Миниатюрными полупроводниковыми электротермометрами агрономы измеряют, как нагревается поверхность листьев растений (рис. 10), а врачи — температуру кожи больного. Крошечные чувствительные элементы термисторов можно вводить прямо в кровеносный сосуд!

Инженеры ставят термисторы в машины, чтобы вовремя получить предупреждение о чрезмерном разогревании детали. Очень широко начинают применяться эти приборы в автоматике, всюду, где нужно поддерживать постоянную температуру или связанные с ней физические явления (например, влажность, скорость движения газа).

Чувствительность некоторых полупроводниковых термометров настолько велика, что на их основе строят особые приемники лучистой энергии — болометры. За несколько километров они могут уловить тепловое излучение горящей папиросы и даже тепловые лучи, испускаемые человеческой кожей. От хорошего болометра не укроется ничто — темной ночью в заснеженной степи он отыщет замерзающего человека, в ненастном небе без радиолокатора найдет невидимый самолет.

## МАШИНЫ ЧУВСТВУЮТ СВЕТ

Есть полупроводники, которые «чувствуют» свет. Световая энергия вызывает в них избыток носителей тока — электронов и дырок.

Давно уже перестали быть редкостью прочные и миниатюрные полупроводниковые «глаза» — фотосопротивления. Они идут в технику на смену хрупким и дорогим стеклянным фотоэлементам и надежно работают в различных автоматических устройствах. Можно, например, заставить падать на фотосопротивление тень от деталей, проходящих по заводскому конвейеру, и таким образом подсчитывать количество выпущенных изделий.

**Рис. 10. Полупроводниковый «градусник» — пирометр — прибор для измерения температуры поверхностей.**

Фотосопротивления умеют оценивать качество шлифовки, окраски изделия. Часто применяются они в аппаратах техники безопасности. Стоит рабочему случайно попасть рукой в опасное место машины, как на фотосопротивление падает тень, и ток, текущий через него, прекращается, что служит командой для немедленной автоматической остановки машины.

С помощью миниатюрных фотосопротивлений сконструирована в СССР интересная «читающая машина» для слепых. Ее чувствительный элемент, двигаясь вдоль строки книги, улавливает очертания букв печатного текста. Электрические сигналы преобразуются в движения маленьких стерженьков, которые слепой ощущает пальцами. Человек, лишенный зрения, получает возможность читать обычные книги, а не только выпуклые тексты, специально изготовленные для слепых, как это было прежде.

Фотосопротивления, как и термисторы, могут обладать очень высокой чувствительностью. Прибавьте к этому надежность и прочность, и вы поймете, как ценны эти приборы для техники.

## НАГРЕВАТЕЛИ И СВЕТИЛЬНИКИ

Представьте себе электрокипятильник для воды в виде небольшой трубки, которая надевается прямо на водопроводный кран. Трубка сделана из стекла, на которое изнутри нанесена тонкая пленка полупроводника. Когда через пленку идет ток, полупроводник сильно разогревается и струя воды в трубке закипает. Вы открываете кран и спустя секунду из трубки льется кипяток!

Некоторые полупроводники создают при электрическом воздействии яркое свечение. Явление объясняется просто: электрическое поле воссоединяет электроны с дырками. Электроны как бы «проваливаются» в дырки. При этом освобождается энергия, которая и выделяется в виде света. Физики пытаются на этой основе создать экономичные, удобные светильники, плоские телевизионные экраны (рис. 11) и многое другое.

Существуют полупроводниковые материалы, которые светятся от воздействия потока электронов, рентгеновских и ультрафиолетовых лучей. Эти вещества — отличные покрытия для экранов рентгеновских установок, телевизионных трубок, ламп дневного света. Люминофоры — светящиеся материалы, которые в наши дни все шире входят в технику, в быт, даже в искусство,— это не что иное, как полупроводники.

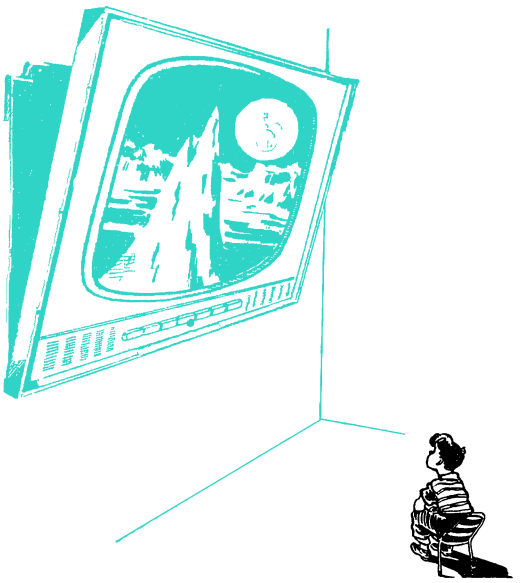


**Рис. 11. Примерно так будет выглядеть плоский телевизионный экран.**

Из полупроводников теперь делают счетчики радиоактивных частиц, всякого рода индикаторы и указатели, которые светят непрерывно десятки лет, питаясь энергией радиоактивного распада какого-либо вещества. Известны, наконец, полупроводники, которые способны как бы заряжаться светом, а потом отдавать его по электрической «команде».

## ЗАПИРАЮЩИЙ СЛОЙ

До сих пор мы говорили о техническом применении полупроводников какого-либо одного вида — либо электронных, либо дырочных. Но есть устройства, в которых сочетаются оба вида полупроводников.

Представьте себе полупроводник, в котором как бы срослись два слоя с разными примесями — электронный и дырочный. Из электронного слоя в дырочный продвигаются благодаря диффузии электроны. Они оставляют пустые места в атомах — дырки. В дырочном же слое электроны-пришельцы «проваливаются» в дырки, количество которых поэтому уменьшается. За границей раздела получается с дырочной стороны избыток электронов, а с электронной —

избыток дырок. В конце концов наступит равновесие, количество электронов-перебежчиков и дырок-перебежчиц уравняется. И тогда в дырочном слое у самой его границы возникнет ряд отрицательных зарядов, а в электронном — ряд положительных зарядов. Между двумя разноименными зарядами, как между обкладками заряженного конденсатора, появится электрическое поле. Оно будет направлено против новых «нарушителей границы». В электронном слое это поле станет задерживать электроны, стремящиеся перейти границу — оттолкнет их обратно. А в дырочной области пограничное поле оттолкнет обратно новых перебежчиц-дырок. Движение зарядов через границу прекратится. На границе возникнет запирающий слой, преодолеть который носители тока не смогут без помощи внешнего электрического поля. Этот запирающий слой — основа многих ценнейших аппаратов и приборов.

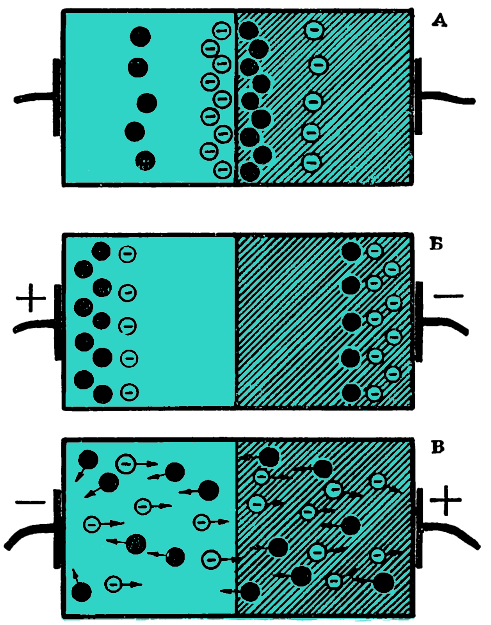



**Рис. 12. На границе электронного и дырочного полупроводников возникает запирающий слой. Он пропускает электрический ток лишь в том направлении, при котором электроны и дырки движутся навстречу друг другу.**

## ВЫПРЯМИТЕЛИ

Техника наших дней широко пользуется выпрямителями — устройствами, которые преобразуют переменный электрический ток в постоянный. Чаще всего это особые радиолампы — кенотроны. Их можно найти в любом сетевом радиоприемнике. Главными частями мощных выпрямителей для радиостанций, электроплавильных печей, электровозов были до недавних пор мотор-генераторы или приборы газового разряда — ртутные лампы. Такие устройства громоздки (для мощного мотор-генератора строят целое здание), неэкономичны, часто выходят из строя.

Теперь появились полупроводниковые выпрямители с запирающим слоем. Они прочны, надежны, миниатюрны и вместе с тем рекордно экономичны.

Пограничное электрическое поле в полупроводнике, состоящем из дырочной и электронной областей, существует всегда, независимо от того, подведены провода от электрической батареи к разным частям полупроводника или нет (рис. 12, *а*). Но внешнее поле сильно влияет на внутреннее поле запирающего слоя.

Если к электронной части полупроводника подвести положительный полюс батареи, а к дырочной — отрицательный, то направление электрического поля батареи совпадет с направлением внутреннего поля в запирающем слое. Это расширит запирающий слой, и ток через прибор не пойдет (рис. 12, *б*). Образно говоря, внешнее поле усилит «стражу пограничников» — электронов и дырок.

А если поменять местами полюсы батареи, то поле батареи и поле запирающего слоя будут направлены в разные стороны. Сильное поле батареи переборет слабенькое поле запирающего слоя, «стража пограничников» — электронов и дырок — будет сметена, и через прибор потечет ток (рис. 12, *в*).

Теперь подведем к прибору переменное внешнее поле, т. е. такое поле, направление которого беспрестанно меняется. Запирающий слой станет то расширяться, то пропадать. При его расширении ток через полупроводник не будет идти, а в моменты исчезновения пойдет. Значит, двухслойный полупроводник пропустит ток лишь в одну сторону и, следовательно, выпрямит переменный ток, превратит его в постоянный.

Купроксные (на закиси меди) и селеновые выпрямительные устройства уже давно применяются в технике. Сейчас внедряются мощные выпрямители из германия и кремния. Их, например, ставят на электровозы. В ближайшие годы во многих отраслях техники полупроводниковыми выпрямителями будут вытеснены дорогие и ненадежные кенотроны, ртутные колбы, мотор-генераторы.

## КРИСТАЛЛЫ И ЛАМПЫ

Простейший полупроводниковый выпрямитель был широко распространен еще лет 30—40 назад, на заре радиовещания. Речь идет о детекторе — сердце детекторного радиоприемника (рис. 13). Кристаллик детектора преобразовывал быстропеременные электрические колебания, пойманные антенной, в пульсирующие постоянные токи, которые в наушниках рождали звук.

Конечно, в те времена детекторы работали не очень хорошо. Включая приемник, приходилось проволочкой нащупывать на кристалле место с хорошим запирающим слоем — «чувствительную точку», которая то и дело сбивалась. Многие изобретатели старались улучшить детектор. Занимался этим и сотрудник Нижегородской радиолаборатории О. В. Лосев. Сочетая в схеме два детектора, он научился слегка усиливать радиосигналы и возбуждать электрические колебания. Радиоприемники Лосева — «кристадины» — долгое время были популярны. Но потом, когда детекторы уступили место радиолампам, о кристадинах забыли.

Несколько десятилетий радиолампы безраздельно господствовали в радиотехнике. Осваивая и совершенствуя их, радиотехника добилась огромных успехов. С участием радиоламп развились радиовещание, телевидение, радиолокация, автоматика, телемеханика. Появилась новая обширная область технической физики— электроника.

Но постепенно становилось ясно, что радиолампы далеко не безупречны. Хрупкие, недолговечные, неэкономичные, они все меньше удовлетворяли конструкторов. И тогда вспомнили о полупроводниковом детекторе. Возникла идея заменить стеклянный пузырь радиолампы твердым полупроводниковым камешком.

Немало усилий потратила наука, чтобы «научить» детектор новым «профессиям». Надо было создать сочетание полупроводниковых кристаллов, способное не только выпрямлять токи, но и в широких пределах усиливать и возбуждать электрические колебания. В 1948 г. проблема была решена. Американцы Бардин и Браттейн создали первый полупроводниковый усилительный прибор.

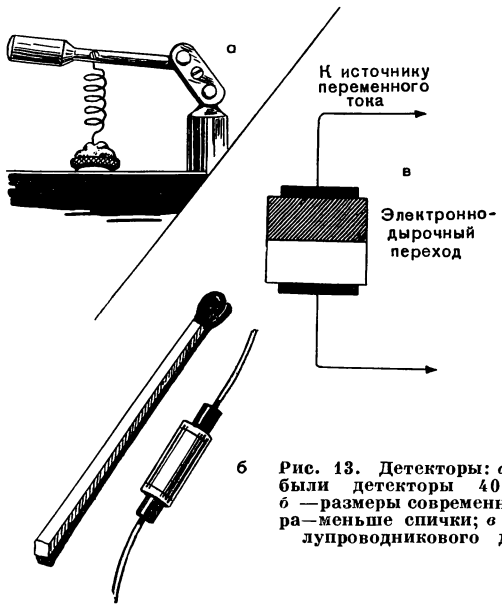



**Рис. 13. Детекторы: *а* — такими были детекторы 40 лет назад; *б* —размеры современного детектора—меньше спички; *в* — схема полупроводникового детектора.**

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТРИОД

Кристаллический усилитель: слабым сигналом отпирает запирающий слой для мощного тока. Представьте себе крошечный кусочек кристаллического полупроводника — германия. У него электронная проводимость. На верхней грани кристалла специальной обработкой (введением примеси) создана область с дырочной проводимостью. Между дырочной и электронной областями образуется, как всегда, запирающий слой. Кристаллик снизу припаян к металлической пластинке — к базе, а сверху к нему присоединены рядышком две проволочки — эмиттер и коллектор. Вот и весь прибор. Он называется полупроводниковым триодом или транзистором.

Когда нужно усилить очень слабый сигнал, его можно включить в прибор по-разному. Например, источник слабого сигнала подклю-

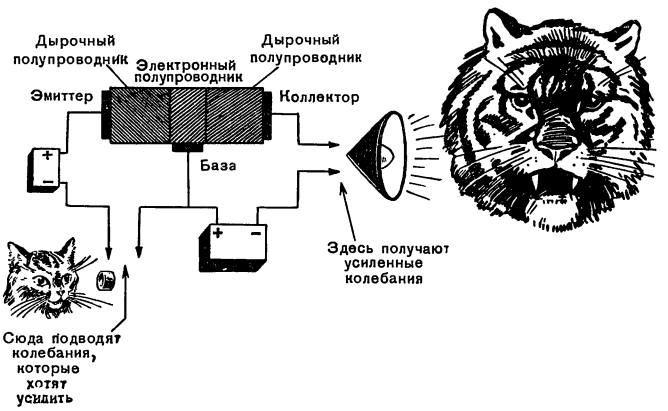



**Рис. 14. Одна из простейших схем включения транзистора (полупроводникового триода) для того, чтобы усилить слабые электрические сигналы.**

чается к эмиттеру и к базе в «пропускном» направлении запирающего слоя («плюс» — к дырочной области). А в цепи базы и коллектора включается сопротивление и батарея в «запретном» направлении запирающего слоя (к дырочной области — «минус»).

Пока сигнала в цепи эмиттера нет, в цепи коллектора ток тоже не идет: его не пускает запирающий слой (рис. 15, *а*). Но вот сигнал подан. Через эмиттер в среднюю (дырочную) область кристалла входит импульс электрического поля (рис. 15, *б*). Он сметает запирающий слой, делая его электропроводным и для «запретного» направления. Между коллектором и базой возникает на мгновение как бы электропроводный мостик, и по нему пробегает усиленный импульс. Когда этот мгновенный импульс пройдет, у эмиттера и коллектора восстанавливаются запирающие слои. Так еле заметные сигналы, проходящие между базой и эмиттером, возбуждают в цепи коллектора и батареи мощный толчок тока. Происходит усиление сигналов.

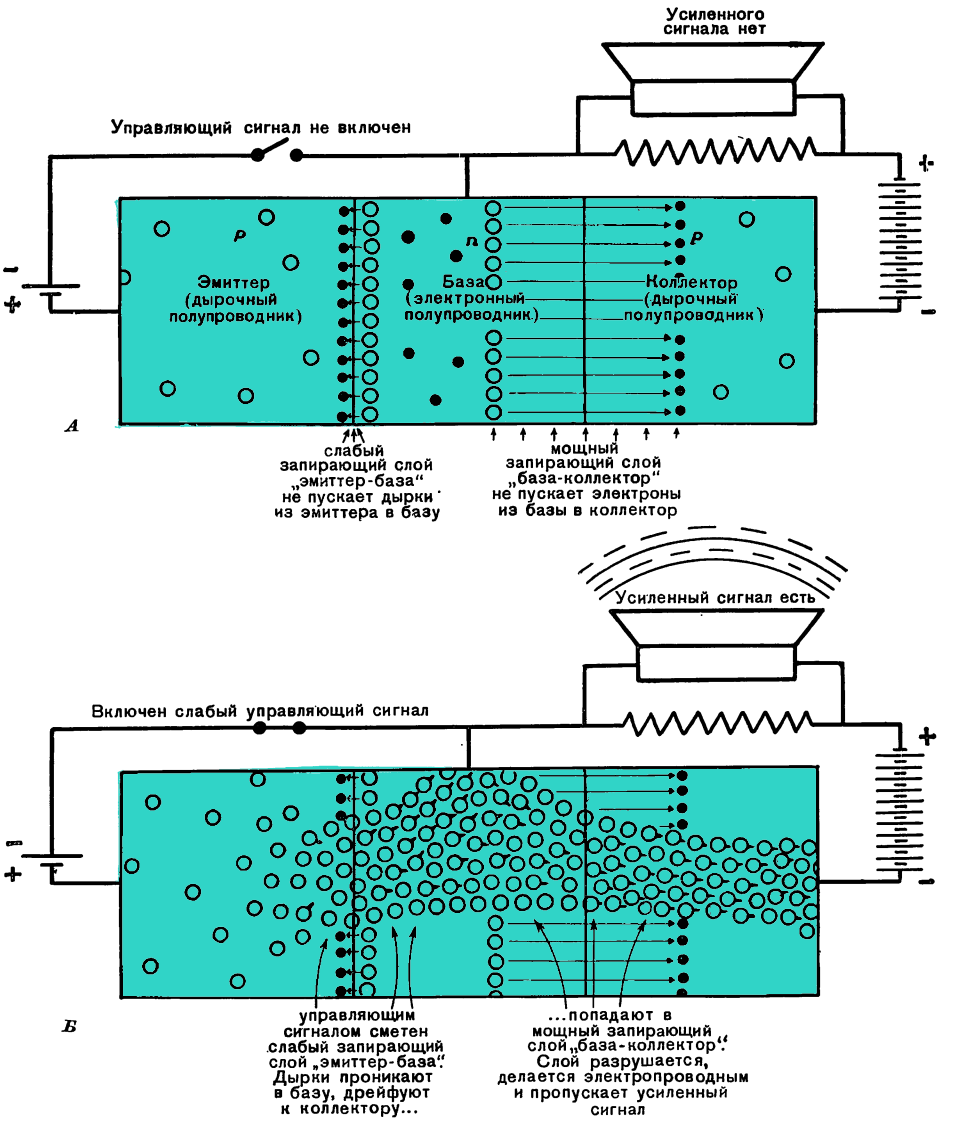



**Рис. 15. Принцип действия транзистора: *А*—слабый импульс в цепи эмиттера «вспрыскивает» дырки в запирающий слой; *Б*— в этот момент между базой и коллектором возникает сильный импульс, который делает запирающий слой электропроводящим.**

За последние годы создано множество разновидностей транзисторов. Выпускаются кристаллические триоды для больших токов, полупроводниковые тетроды и пентоды (приборы с четырьмя и пятью контактами), усиливающие колебания высоких частот.

Разработаны полупроводниковые усилители, действующие на совершенно новых принципах. Физики предложили, например, погружать транзисторы в жидкий гелий. Там при сверхнизкой температуре приборы действуют с небывалой точностью и чистотой. Другой пример: созданы транзисторы (на основе кристаллов алмаза), способные безотказно действовать при температуре в сотни градусов.

## ПРОЧНОСТЬ, МИНИАТЮРНОСТЬ

Обходясь без радиоламп, удается делать передатчики и приемники исключительно прочными. Их можно смонтировать даже в обыкновенном слесарном молотке. Сколько ни стучи

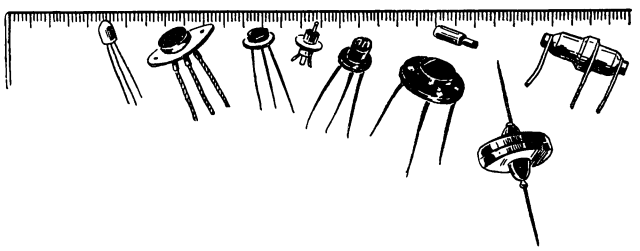


Рис. 16. Типы современных транзисторов на сантиметровой масштабной линейке.

таким молотком, радиоприбор не испортится, не перестанет работать. Радиостанцию на кристаллах можно вмонтировать в артиллерийский снаряд, поставить на искусственный спутник Земли, на межпланетный корабль. Ей не страшны ни самая сильная тряска, ни самые резкие удары.

Очень ценна и миниатюрность полупроводниковых радиоприборов (рис. 16). Давно перестал быть редкостью приемник величиной с портсигар, даже со спичечную коробку. Читатель, немного знакомый с радиотехникой, без особых затруднений может построить миниатюрный полупроводниковый приемник (рис. 17).

Совсем крошечные полупроводниковые радиостанции помещают в медицинских приборах. Таков, например, радиозонд для исследования внутренних органов человека — это маленькая, вроде фасолины, «пилюля», в которой спрятан радиопередатчик на кристалликах. Человек проглатывает такую «пилюлю», и она, блуждая по кишечнику, методично посылает условные радиосигналы о состоянии внутренних органов, о температуре в них, давлении и т. д.

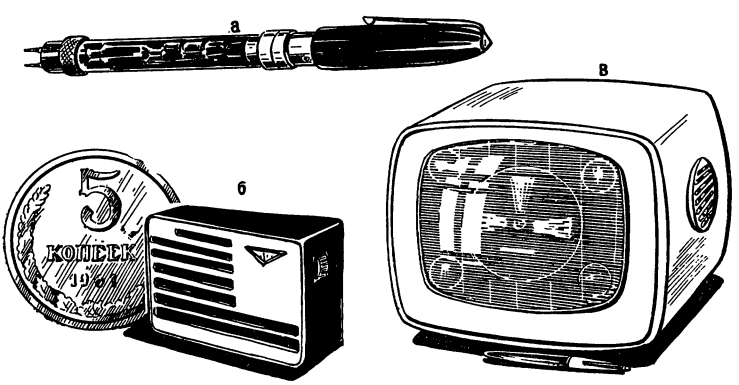



Рис. 17. В радиопромышленности идет процесс «миниатюризации»: *а* — радиоприемник, сконструированный из микромодулей в корпусе авторучки; *б* — современный миниатюрный приемник; *в* — телевизор «Спутник-2» с полупроводниковыми деталями в сравнении с авторучкой.

Огромную роль обещают сыграть полупроводники в развившейся за последние годы электронно-вычислительной технике. Поначалу в кибернетические машины приходилось ставить сотни и тысячи радиоламп, потому что эти устройства «думали» именно с помощью радиоламп. Понятно, что ламповые машины занимали большие комнаты, целые залы, даже здания, к тому же часто портились, а при работе потребляли огромное количество энергии. Но когда появились полупроводники, электронно-счетные и управляющие машины были быстро «переучены». Они стали «думать» с помощью кристаллических триодов и других полупроводниковых деталей. Кибернетический «мозг» уменьшился во много сотен раз. Энергии ему требуется теперь совсем немного.

## ПЕРЕВОРОТ В РАДИОТЕХНИКЕ

Для миниатюрных радиоустройств на кристаллах изобретены и соответствующие им крохотные источники питания, например батарейки величиной с трехкопеечную монету. Благодаря скромному «аппетиту» полупроводников такой батарейки им хватает на несколько месяцев. Строятся радиопередатчики, в которых источник энергии сам передаваемый звук. Человек говорит в микрофон, звуковые колебания преобразуются в импульсы тока: одна часть их поступает на усиление, а другая сглаживается и питает усилитель энергией. Весь передатчик умещается в корпусе микрофона. Можно использовать для питания полупроводниковых радиоприемников и даже радиопередатчиков энергию радиоволн. Если приемник настроен на какую-либо слабую радиостанцию, то энергия радиоволн другой работающей в это же время мощной радиостанции тоже улавливается и используется на питание триодов усилителя.

Переворот в радиотехнике вызван также появлением миниатюрных радиодеталей: индукционных катушек, сопротивлений, ферритовых магнитных антенн величиной с карандаш, крошечных, но достаточно емких конденсаторов. Развиваются техника и технология производства всевозможных радиоприборов. Вместо ювелирной ручной сборки на радиозаводах появились механизированные конвейеры и автоматика.

Широко внедряется метод печатных схем: радиоаппаратура изготовляется своеобразным типографским способом, словно открытки или

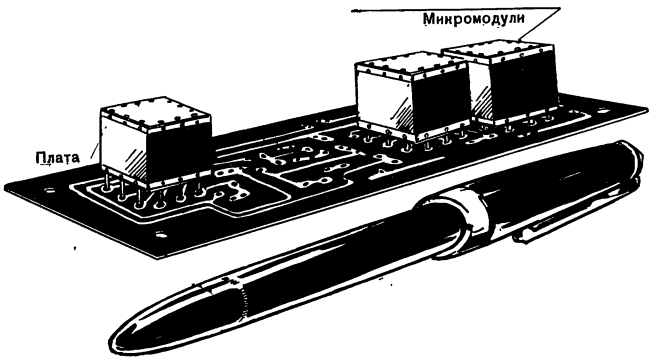



Рис. 18. Установка микромодулей на плате.

почтовые марки. Интересная новинка — так называемые микромодули (рис. 18). Это тонкие листки, на которых отпечатаны диоды, триоды, сопротивления и прочие элементы радиосхем. Складывая эти листки в стопки, получают бесчисленные варианты радиоприборов. Миниатюрность, экономичность и надежность сочетаются в них с быстротой и легкостью монтажа. Наконец, удается печатать сложнейшие радиосхемы на непрерывных лентах. Работая с ними, радиоконструктор становится похожим на портного-закройщика: из ленты вырезает ножницами необходимые куски и соединяет их в нужном порядке.

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ ИЗ ТЕПЛА

В далеких деревнях и селах, в домах лесников и бакенщиков можно встретить своеобразную керосиновую лампу — «электростанцию»: она не только светит, но и вырабатывает электрическую энергию. Устройство ее довольно просто. Полупроводниковые брусочки смонтированы в виде трубки, которую надевают на укороченное ламповое стекло. Когда лампа зажжена, грани брусочков, обращенные внутрь трубочки, разогреваются теплом горячих газов, поднимающихся от пламени. Противоположные же их грани охлаждаются комнатным воздухом. И в результате в полупроводниковой батарее рождается электрическая энергия.

Батарея построена из брусочков двух типов — электронных и дырочных. Все они соединены попарно. Каждая пара спаяна металлической пластинкой, образуя нечто вроде буквы «П» (рис. 19). Место спая нагревается, а противоположные грани брусочков охлаждаются. Нагрев рождает избыток носителей тока, причем в разных полупроводниках разного знака. В электронном брусочке освобождаются электроны, а в дырочном — дырки. У нагретых граней возникает как бы «толчея» носителей тока, электроны и дырки перекочевывают к холодным граням — там «спокойнее». В результате у холодной грани дырочного брусочка возникает положительный заряд, а отрицательный — у холодной грани электронного брусочка. Если холодные грани всех пар соединить проволокой, по ней потечет ток, возбужденный с помощью тепла.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

Полупроводниковые термоэлектрогенераторы будут, конечно, широко применяться в технике. Ведь тепло в них превращается в электроэнергию непосредственно — совсем не так, как, скажем, на современных тепловых электростанциях, где работают паровые котлы, турбины, электрогенераторы. В полупроводниковых термобатареях нет никаких промежуточных преобразований энергии, никаких движущихся частей. Как заманчиво было бы установить большую батарею полупроводников прямо в топке электростанции!

Однако в наши дни такие устройства применяются лишь в маленьких приборах. Дело в том, что они пока менее экономичны, чем обычные турбины и котлы. Коэффициент полезного действия термопары 6—8%, а в лабо-

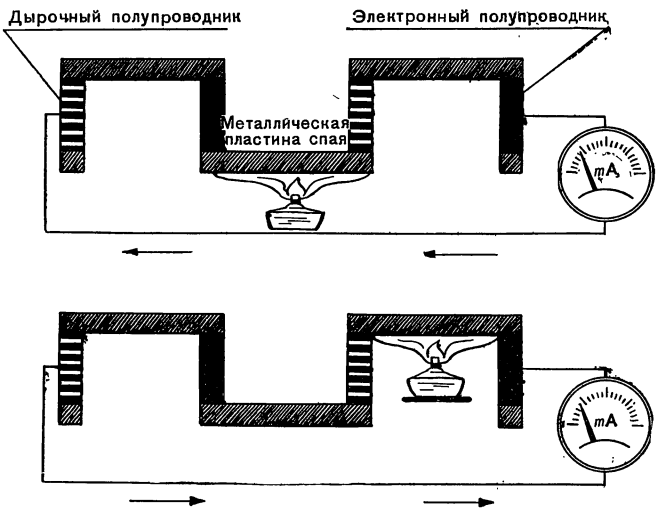



Рис. 19. Схема действия полупроводниковой термопары.

раторных условиях около 10%. Это, вообще говоря, немало. Примерно таков же к. п. д. у паровоза. Но все же это в несколько раз меньше, чем к. п. д. у современных тепловых электростанций.

Физики стремятся сейчас усовершенствовать полупроводниковые термоэлектрогенераторы — повысить их мощность и экономичность. Но и в нынешнем виде они могут применяться довольно широко: там, где нужно использовать так называемое низкопотенциальное тепло, т. е. теплоту, заключенную в массах вещества со сравнительно невысокой температурой,— в дыме заводской трубы, в сбросной воде завода. Значительное количество такой теплоты сейчас бесполезно теряется, а с помощью полупроводников она может быть преобразована в электроэнергию. Кое-что в этом направлении уже сделано. Например, создан термоэлектрогенератор, вырабатывающий электрический ток из тепла выхлопных газов автомобильного двигателя. Полученная таким способом энергия сразу же идет на подзарядку аккумуляторов.

## НОВЫЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ

С брусочками полупроводниковых термопар можно делать странные на первый взгляд превращения. Мы нагреваем их с одной стороны, охлаждаем с другой, и они порождают электроэнергию. А что, если просто пропустить через них постоянный электрический ток? Тогда они с одной стороны нагреются, а с другой охладятся, ибо внешнее электрическое поле перераспределит электроны и дырки, как бы «растянет» их в разные места. Там, где возникнет недостаток носителей тока, они начнут образовываться заново, черпая на это энергию из окружающей среды, и тем самым охладят ее. Там же, где носители тока будут в избытке, электроны станут воссоединяться с дырками, энергия начнет выделяться в виде теплоты. Таким образом, в брусочках возникнет разность температур.

На этой основе в Институте полупроводников Академии наук СССР было разработано несколько систем холодильников. В них нет ни движущихся жидкостей, ни моторов, ни компрессоров. В заднюю стенку холодильного шкафа вмонтирована небольшая плитка, собранная из полупроводниковых термопар. Она соприкасается с двумя радиаторами: один выходит наружу холодильника, другой расположен внутри него. Полупроводниковый выпрямитель преобразует переменный ток электросети и питает холодильник постоянным током. Холодильник действует, совершенно не изнашиваясь. По экономичности же последние модели этих устройств не уступают обычным холодильным установкам. Сейчас полупроводниковые холодильники успешно действуют на борту нескольких самолетов ТУ-104.

Способность полупроводников создавать искусственный холод пригодится, конечно, не только в быту. Для научных исследований созданы холодильники-малютки величиной с наперсток. Никаким другим способом их построить невозможно. Врачи надеются получить от физиков холодильный полупроводниковый пластырь, даже охлаждающее устройство, предназначенное для ввода в человеческое тело. Все это под силу технике наших дней.

## НАГРЕВ ВМЕСТЕ С ОХЛАЖДЕНИЕМ

Стоит переменить направление тока через полупроводниковую батарею — и холодильник словно «выворачивается наизнанку». Там, где был недостаток носителей тока, теперь избыток, и наоборот. Тепло и холод меняются местами. Греются уже не внешние, а внутренние концы полупроводниковых брусочков. Из холодильника получается духовой шкаф. Разумеется, и эту возможность, совершенно недоступную обычным холодильным аппаратам, техника охотно использует всюду, где необходимо поддерживать постоянную температуру или попеременно разогревать и охлаждать какую-нибудь деталь. Например, германиевые полупроводниковые триоды плохо переносят изменение температуры, поэтому их полезно помещать в полупроводниковые же термостаты.

Войдя в жилой дом недалекого будущего, вы увидите под подоконниками широкие пластины радиаторов. Но ни парового, ни водяного отопления в этом доме не будет. Такие же пластины — и с наружной стороны стен. А между внутренними и внешними радиаторами будут установлены батареи полупроводниковых термопар. Пропуская через них постоянный ток в определенном направлении, мы заставим комнатный радиатор нагреваться. А летом, в жаркую погоду, ток включат в обратном направлении. Комнатный радиатор вберет теплоту окружающего воздуха и охладит помещение.

Такая система проста, надежна, гигиенична. Но главное ее достоинство — большая эко-

номичность. Комната станет обогреваться не только за счет энергии электрического тока, пропускаемого через полупроводники. В какой-то мере отоплению поможет охлаждение и без того холодного уличного воздуха. Ведь он будет «работать», отдавая свое тепло наружному радиатору. Правда, при сильном морозе «переброска» тепла в здание извне будет незначительной. Но при температуре воздуха от —5° Ц до +10° Ц полупроводниковый «тепловой насос» может принести большую пользу. Первые отопительно-охладительные полупроводниковые агрегаты уже созданы и испытываются.

## ВЕНТИЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕМЕНТ

Среди наших читателей, несомненно, есть немало фотолюбителей, а из них многие знакомы с удобным прибором, определяющим экспозицию при съемке, — с фотоэлектрическим экспонометром. Вы открываете крышку прибора, направляете его «глаз» на предмет, который хотите сфотографировать, и стрелка на шкале тут же показывает, какую надо сделать выдержку. Прибор не требует никаких источников питания — батареек, аккумуляторов. Он преобразует световую энергию в энергию электрического тока, отклоняющего стрелку. Свет превращается в ток.

Чувствительный элемент экспонометра сделан из полупроводника селена, обладающего дырочной проводимостью. Он лежит на стальной подложке. На внешнюю поверхность селена нанесена тонкая пленка металла, например золота. И эта добавка превращает поверхностную область полупроводника из дырочной в электронную.

В электронной области обстрел световыми частицами (фотонами) освобождает из атомов электроны. Они мечутся, сталкиваются и, «не умещаясь» в тоненьком слое электронного селена, уходят в пленку золота. Иного пути у них нет, так как в дырочную область дорога закрыта запирающим слоем. Поэтому в пленке золота накапливается избыток электронов — отрицательный электрический заряд. Вместе с электронами в электронной области, естественно, образуется и некоторое количество дырок. Для них запирающий слой не преграда. Положительный заряд — как бы «пропуск» для прохода через границу. И благодаря этому на стальной подложке возникает положительный заряд. Таким образом, энергия света создает разность потенциалов между противоположными поверхностями полупроводниковой пластинки. Если эти поверхности соединить проволочкой, возникнет электрический ток, который будет течь, пока селен освещен. И ток будет тем сильнее, чем сильнее освещение.

Такие вентильные, по терминологии физиков, фотоэлементы известны уже давно. Они широко применяются в различных автоматических устройствах: например, отлично справляются с анализом крови (фиксируют ничтожное различие в количестве красных кровяных телец), непрерывно следят за насыщенностью крови кислородом при хирургических операциях и т. д. Однако до недавних пор у полупроводниковых фотоэлементов был очень низкий коэффициент полезного действия — они преобразовывали в электрическую энергию лишь тысячные доли энергии падающего светового потока.

## СВЕТ РАБОТАЕТ

Несколько лет назад удалось создать фотоэлементы, способные преобразовывать в электрический ток до 13% энергии падающего света. Элементы эти состоят из тонких пластинок, вырезанных из крупных, специально выращенных кристаллов полупроводника кремния. Квадратный метр поверхности прибора, освещенной солнцем, способен дать до 120 *вт* электроэнергии. В солнечный день батарея кремниевых фотоэлементов площадью в половину газетной страницы может питать, например, электромотор стандартной швейной машины.

Несмотря на трудность очистки и обработки кристаллов кремния, такие фотоэлементы уже внедряются в технику. Созданы приемники, передатчики и другие приборы, питающиеся от солнечных батарей (рис. 20). Выпускаются даже часы, «заводящиеся» светом, фото- и киноаппараты, которые не только сами угадывают экспозицию, но и «солнечной силой» устанавливают нужную диафрагму.

Солнечные батареи дают энергию телефонным подстанциям. Построены модели механизмов оросительных систем, «солнцемобилей» и судов, использующих энергию солнечных лучей. Представьте себе экипаж, который движется без всякого горючего лишь потому, что освещен солнцем. Правда, наземные транспортные средства такого рода едва ли получат сколько-нибудь заметное распространение. Мощность солнечного излучения для них все

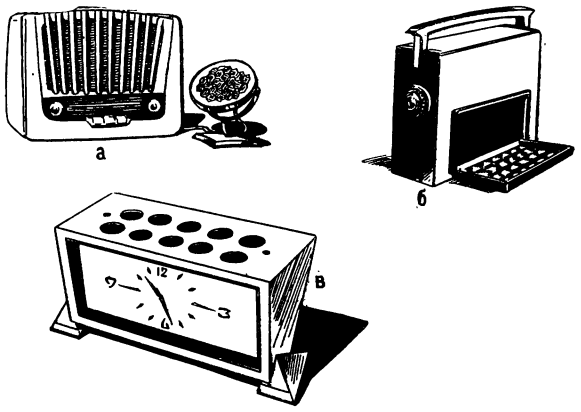



**Рис. 20. Радиоприемники *(а* и *б)* и часы *(в)*, работающие на энергии, полученной от солнечного света.**

же мала. Но, скажем, речные баржи, обладающие большой поверхностью, вполне способны были бы двигаться за счет энергии солнечных лучей.

В наземном транспорте солнечные батареи смогут быть дополнительными и аварийными источниками энергии Если в автомобиле истощатся аккумуляторы, то до зарядной станции он «дотянет» на солнечных лучах, улавливая их крышей — фотоэлементом. К тому же на любой дневной стоянке такой автомобиль будет непрерывно набирать энергию в свои аккумуляторы.

## К СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Особенно велика ценность полупроводниковых «ловушек света» для энергетики, которую принято называть «малой». Солнечные батареи дадут энергию в неэлектрифицированных районах: в горах, на островах, в тайге — всюду, куда трудно тянуть линию электропередачи, а строить электростанции невыгодно. Подсчитано, что, если на крыше дома разместить солнечные фотоэлементы, они обеспечат энергией и отопительные электропечи, и кухонные плиты, и осветительные приборы — словом, все бытовые нужды.А как заманчиво было бы устроить солнечные фотоэлементы в виде ткани, скатывающейся в рулон! На привале геолог или турист размотает такой коврик, разложит его — и готова электростанция. Можно включить электроплитку, миниатюрный полупроводниковый холодильник или, скажем, согреть воздух в палатке.

На наших спутниках, ракетах, автоматических межпланетных станциях солнечные батареи дают электрический ток радиостанциям и другим приборам бортовой аппаратуры (рис. 21). Двигаясь к Марсу или к Венере, межпланетный корабль летит в мощном световом потоке незаходящего Солнца. И даже при нынешнем коэффициенте полезного действия солнечных батарей применение их на десятки тонн снижает вес космического корабля.

Следует отметить, что современные кремниевые фотоэлементы, по всей видимости, еще не самые эффективные. Ученые пытаются их усовершенствовать и, главное, ищут новые материалы, способные освоить бо́льшую долю световой энергии, чем кремний. Теоретически возможно создать полупроводниковые солнечные батареи, превращающие в электрический ток почти половину энергии падающего на них света.

## ПОЛУПРОВОДНИКИ И ЖИЗНЬ

Рождение солнечной энергетики — начало нового этапа в истории техники. До недавних пор лишь растения могли задерживать, накоплять и использовать энергию солнечного луча. Все запасы ископаемого топлива в конечном итоге — «консервы солнечного света», заготовленные некогда зелеными листьями древних растений. С помощью полупроводников человек лишил природу этой монополии.

Между прочим, в зеленом листе, как выясняется, происходят явления, весьма схожие с теми, которые протекают в вентильных фото-

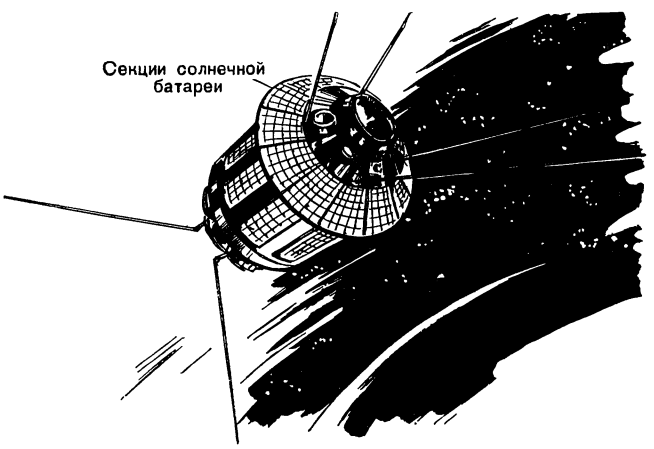



**Рис. 21. Автоматическая межпланетная станция получает энергию от солнечных лучей.**

элементах. Сегодня в лабораториях с помощью окрашенных полупроводников уже осуществлен первый этап фотосинтеза — процесса, который преобразует солнечный свет в химическую энергию живого вещества, накапливает ее и питает всю органическую жизнь Земли. Перед наукой открылась заманчивая перспектива — применить искусственный фотосинтез в широких масштабах. Предстоит научиться синтезировать с помощью солнечного света сложные органические соединения прямо из простых минеральных солей воды и воздуха, минуя растения. Успехи физики полупроводников вместе с достижениями химии и биологии ведут к решению этой проблемы.

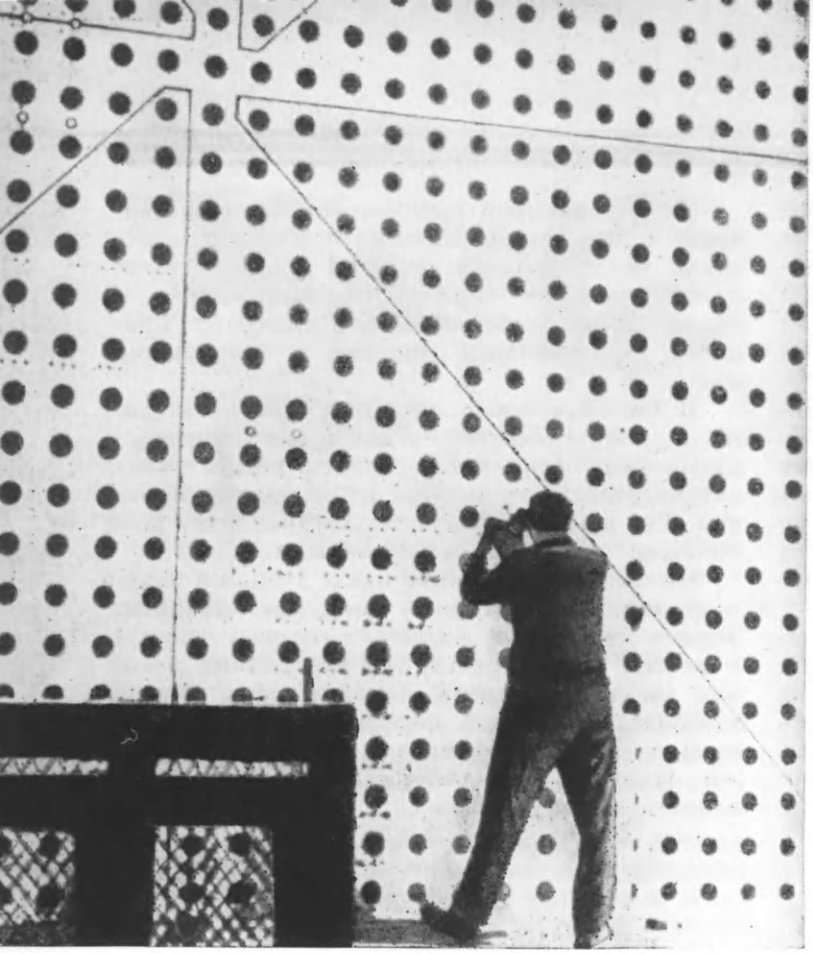
Физика полупроводников и в других областях тесно соприкасается с наукой о жизни. Электронные явления, сходные с процессами в запирающих слоях, играют огромную роль в физиологии нервной системы, а природные приспособления, подобные вентильному фотоэлементу,— в физиологии зрения.

Полупроводники приобретают большое значение и для химии. Катализ — процесс, в котором малые добавки тех или иных веществ резко ускоряют химические превращения,— оказывается, можно объяснить влиянием примесей на электронные явления в полупроводниках.

В биохимических реакциях катализаторами служат сложные органические вещества, называемые ферментами, причем живая ткань автоматически регулирует их состав и состояние. Так наш организм ведет управление различными жизненными процессами.

Необыкновенно широк охват учения о полупроводниках. Овладевая полупроводниками, ученые обогащают физику и химию, движут к новым высотам технику, раскрывают вековые загадки биологии. Сегодня даже трудно вообразить в полной мере грядущее развитие физики полупроводников. С каждым годом эти замечательные материалы будут прочнее входить в нашу жизнь.

■



# КАК И ИЗ ЧЕГО ВЕЩЕСТВО ПОСТРОЕНО

## ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

### МОЛЕКУЛЫ И АТОМЫ

Тела, которые кажутся нам сплошными, на самом деле состоят из мельчайших частиц — молекул (рис. 1). Наука установила, что молекулы состоят из еще более мелких частиц — атомов. Химическими средствами — сжиганием, действием кислот, щелочей и т. п.— можно только изменить сочетание атомов в молекуле, но нельзя ничего сделать с самими атомами. Поэтому с точки зрения химиков атомы — это простейшие частицы вещества. Вещества, построенные только из одного вида атомов, химия так и называет простыми веществами или элементами. Сейчас известны 104 элемента. Столько же и разных видов атомов, отличающихся химическими свойствами.

Само название «атом» означает по-гречески «неделимый». Но с развитием науки атомы потеряли право считаться простейшими части-

цами вещества. В своем победном шествии атомная и ядерная физика разложила атом и его ядро на более простые составные части — на элементарные частицы.

Изучение элементарных частиц вышло из ведения химии и стало одним из важнейших разделов современной физики.

## ВНУТРИАТОМНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Каждый атом состоит из ядра и электронов (рис. 2 и 3). Ядро несет положительный, электроны — отрицательный электрический заряд. Ядро атома состоит из двух видов элементарных частиц: протонов и нейтронов (рис. 4). У протона положительный электрический заряд. У нейтрона заряда нет; иначе говоря, он электрически нейтрален, потому он так и называется. Таким образом, все предметы, которые нас окружают, составлены всего из трех видов элементарных внутриатомных частиц: из протонов, нейтронов и электронов.

На первый взгляд кажется, что картина мира резко упростилась: вместо 104 видов атомов — всего три вида элементарных частиц. Но развитие науки богато неожиданностями: как раз в тот момент, когда ученые окончательно убедились, что мир построен из протонов, нейтронов и электронов, физики начали обнаруживать в неожиданном изобилии, как грибы после дождя, новые, дотоле неизвестные частицы. Правда, электрон, протон и нейтрон не удалось разложить на еще более простые составные части. Эти частицы современная наука относит к элементарным, т. е. простейшим, частицам. Но наряду с ними открыто много других элементарных частиц, обладающих самыми удивительными и неожиданными свойствами. Даже физики, привыкшие ничему не удивляться, так и назвали некоторые из этих частиц «странными частицами».

Рис. 1. Молекула углекислого газа $CO_2$.

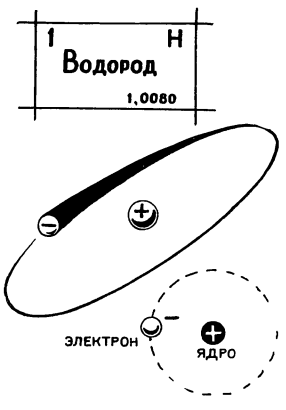



Рис. 2. Схема атома водорода.

Сейчас известно множество различных видов элементарных частиц. Из них только три, о которых мы уже говорили, внутриатомные, т. е. участвуют в построении атомов, а следовательно, и всех обычных тел. Остальные частицы совсем не похожи на частицы вещества в нашем обычном представлении. В большинстве своем они неустойчивы и за ничтожные доли секунды претерпевают самые неожиданные превращения. Такие частицы встречаются лишь там, где они непрерывно образуются. Чтобы открыть их, потребовалось величайшее искусство физиков.

## КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Научные открытия нередко делаются совсем не там, где их ожидали. Колумб хотел попасть в Индию, а открыл Америку. Нечто подобное произошло и с космическими лучами. Это открытие было сделано при изучении электропроводности воздуха.

Всем известно, что медь и другие металлы хорошо проводят электрический ток, а стекло, фарфор, резина почти не проводят. Воздух, как и все газы, хороший изолятор, но и его можно заставить проводить электрический ток. Для этого нужно оторвать электроны от некоторых атомов газа и тем самым создать в воздухе положительно заряженные атомы — ионы. Какое-то очень малое количество ионов есть в воздухе всегда, что легко доказать с помощью электроскопа (рис. 5). В этом приборе к стерженьку, сделанному из изолятора, прикреплены два тонких металлических листочка. Если сообщить листочкам заряд, они оттолкнутся друг от друга и остановятся, образовав некий угол. Опыт показывает, что за достаточно долгое время листочки электроскопа опять сходятся. Это значит, что есть утечка заряда. Если поместить электроскоп под стеклянный колпак и откачать насосом воздух, утечка заря-

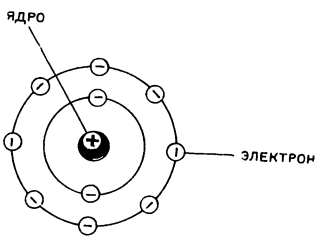



Рис. 3. Схема электронных оболочек неона.

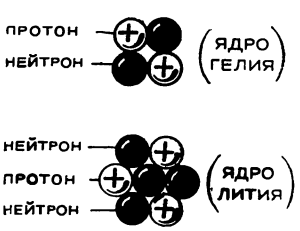



Рис. 4. Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов.

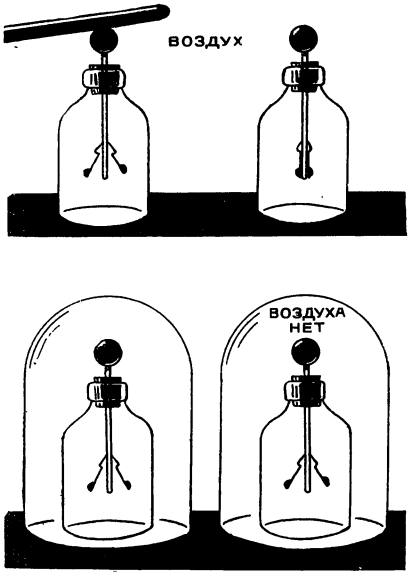



**Рис. 5. Электроскоп показывает, что в воздухе есть ионы.**

да прекратится. Значит, заряд уходит через воздух. Чем больше в воздухе ионов, тем быстрее утекает заряд.

Что же создает в воздухе ионы? Если причина этого в Земле, нужно подняться вверх, и утечка заряда уменьшится. И вот стали поднимать электроскопы на воздушных шарах. Результат опытов всех удивил: чем выше поднимали электроскоп, тем быстрее утекал с его листочков заряд. Оказалось, что причина, создающая в воздухе ионы, находится не в Земле, а в космическом пространстве. Незначительное количество ионов создается радиоактивными излучениями Земли, но на большой высоте эти излучения не сказываются.

Отрыв электронов от атомов могут вызвать либо световые лучи, либо потоки быстрых заряженных частиц. Такие потоки довольно трудно отличить от лучей, поэтому их часто тоже называют «лучами».

Долгое время было неизвестно, что именно приходит на большой высоте из космического пространства и создает ионы в воздухе. Чтобы решить эту загадку, пришлось поставить очень много опытов. Помещая электроскоп в камеру с толстыми стенками, ученые доказали, что ионизация воздуха производится каким-то излучением, способным проникать даже через толстый слой свинца.

Дальнейшие опыты выяснили, что это «проникающее излучение» приходит не только со стороны Солнца, но почти равномерно со всех направлений, т. е. из всего космического пространства. Поэтому проникающее излучение и назвали космическими лучами. В действительности эти лучи — потоки быстрых заряженных частиц.

В первичных космических лучах, когда они приходят из мирового пространства, нет никаких необычных частиц. Это просто атомные ядра. Электромагнитные силы, действующие в космическом пространстве, разгоняют эти ядра до очень большой скорости и тем самым сообщают им громадную энергию. Но когда частицы с такой энергией сталкиваются с частицами воздуха, происходят неожиданные превращения. При таких столкновениях и рождаются новые неустойчивые элементарные частицы.

Долгие годы ученые находили новые частицы только в космических лучах. Они поднимались для этого на высокие горы, забрасывали свои приборы на воздушных шарах в недоступные человеческому организму высоты. Но постепенно выяснилось, что для изучения новых элементарных частиц нет необходимости гоняться за космическими лучами. Неустойчивые элементарные частицы можно получить и искусственно.

## УСКОРИТЕЛИ

Все разнообразие новых необычных элементарных частиц можно получить при столкновениях самых обыкновенных внутриатомных частиц, если только они разогнаны предварительно до высокой энергии. Такой разгон достигается в особых установках — ускорителях. Современный ускоритель — громадное и сложное сооружение, одно из подлинных чудес техники. Заряженные частицы получают в нем энергию от радиоволн или переменных токов высокой частоты и большой мощности. Чтобы частица при этом не сбилась с пути, ее надо ограничить определенным направлением, как поезд рельсами. Для этого используют сильный магнит. Он создает в пространстве магнитное поле, которое и выполняет роль рельсов, направляющих ускоряемые частицы по определенному пути.

Магнитное поле удобно представлять себе состоящим из силовых линий, которые, подобно нитям, натянуты между полюсами магнита. Когда заряженная частица пролетает через магнитное поле, оно не разгоняет и не замедляет ее, но непрерывно изгибает ее путь. Если никакие другие силы не действуют, частица

огибает силовые линии магнитного поля по окружности.

Переменным электрическим напряжением высокой частоты можно «подталкивать» частицу в такт с ее вращением. Тогда переменное электрическое поле будет передавать свою энергию частице и ее движение будет ускоряться. На этом принципе построен круговой циклический ускоритель—циклотрон (рис. 6).

Энергия движущейся частицы зависит от ее массы и скорости. Пока скорость мала в сравнении со скоростью света, масса частицы постоянна и энергия, передаваемая частице, расходуется на увеличение скорости, а масса почти не меняется. Частицы, движущиеся со скоростью, близкой к скорости света, называются релятивистскими, т. е. «относительностными». Такое название означает, что их движение происходит по законам, выведенным теорией относительности. Передачу энергии релятивистским частицам условно называют «ускорением частиц», хотя в действительности при этом скорость почти не возрастает, а растет масса частицы.

В магнитном поле релятивистская частица вращается по кругу ускорителя не в такт (или, как говорят, не в фазе) с ускоряющим переменным электрическим полем, так как масса частицы увеличивается. Представим себе, что на танцплощадке во время вальса танцующих кормят, да так основательно, что они тут же «поправляются», т. е. прибавляют в весе. На такой площадке трудно было бы кружиться в такт мелодии, музыкантам пришлось бы замедлять темп по мере того, как танцующие толстеют. Такие же меры принимают и в ускорителе. Если частицам нужно придать очень большую энергию, приходится во время ускорения непрерывно менять частоту радиоволны (такой ускоритель называется фазотроном), или силу магнитного поля (синхротрон), или же и то и другое (синхрофазотрон) (рис. 7). Такие ускорители дают возможность сообщать заряженным частицам энергию достаточно высокую, чтобы получить новые элементарные частицы.

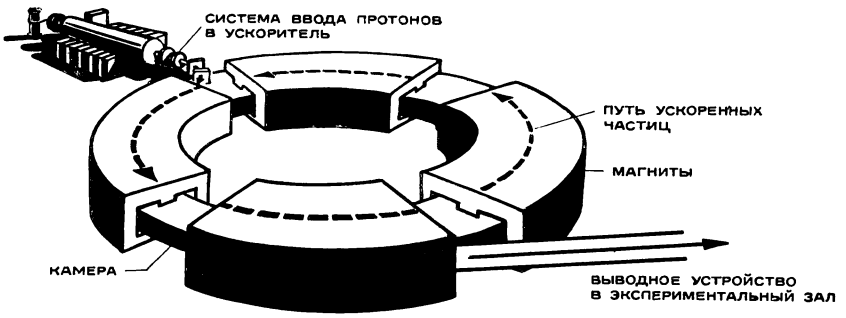



Рис. 7. Схема действия синхрофазотрона—сверхмощного ускорителя частиц.

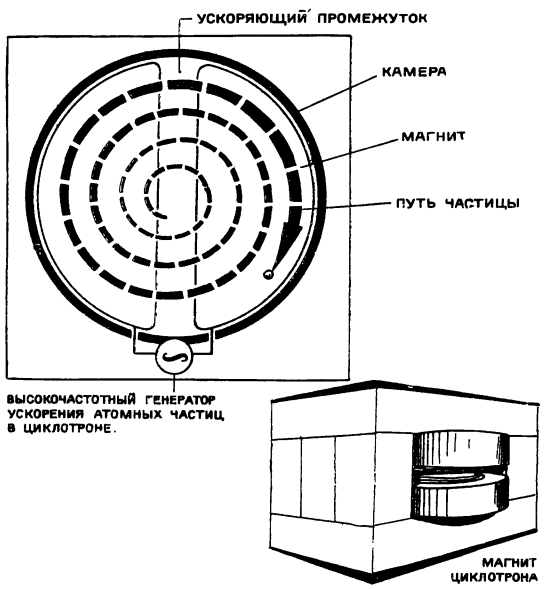



Рис. 6. Схема ускорения атомных частиц в циклотроне.

## ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Самое важное и замечательное свойство элементарных частиц — это способность к превращениям. Раньше думали, что превращаться могут только сложные частицы, состоящие из более простых. Но опыт показал, что к взаимным превращениям способно большинство элементарных частиц. Мы знаем, что атомы построены из трех видов таких частиц: электронов, протонов и нейтронов. Если эти частицы не включены в атом, а находятся в свободном состоянии, устойчивыми будут только протоны и электроны. Свободный нейтрон самопроизвольно распадается на протон и электрон. При этом возникает еще одна неуловимая частица, но о ней мы расскажем потом.

В большом количестве нейтронов один распадается раньше, другой — позже, но в сред-

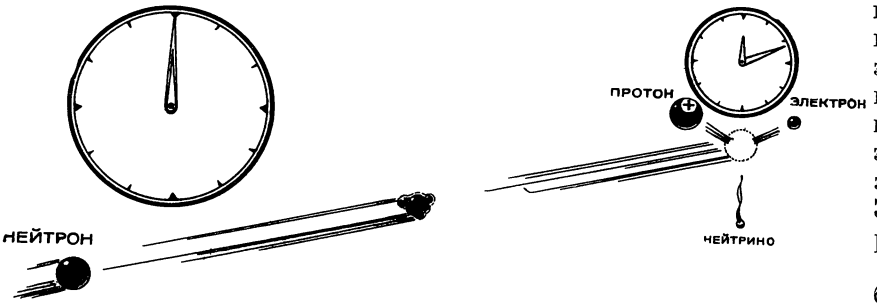



Рис. 8. Самопроизвольный распад нейтрона.

нем свободный нейтрон может «прожить» только около четверти часа (рис. 8).

В мире элементарных частиц такое время «жизни» можно считать очень продолжительным. Другие элементарные частицы распадаются в миллионы и миллиарды раз быстрее.

Итак, свободный протон устойчив, а свободный нейтрон распадается на протон и электрон. Казалось бы, можно сделать вывод, что нейтрон не элементарная частица, что он состоит из протонов и электронов. Оказывается, ничего подобного. Когда нейтроны и протоны связаны в атомных ядрах, устойчивость этих частиц изменяется. При определенных соотношениях между числом протонов и числом нейтронов ядро устойчиво: ни протоны, ни нейтроны не распадаются. Но если в такое устойчивое ядро добавить лишние нейтроны, оно станет неустойчивым (радиоактивным). Лишние нейтроны распадаются в ядре так же, как и свободные нейтроны,— на протон и электрон. Но вот что самое удивительное: если добавить в устойчивое ядро протоны, оно также перестает быть устойчивым. В таком ядре распадаются лишние протоны! Связанный, но лишний протон распадается на нейтрон и частицу, подобную электрону, но только с положительным электрическим зарядом. Эту частицу назвали позитроном. Распад нейтронов или протонов с испусканием электронов или позитронов называют бета-распадом (рис. 9). Это одна из разновидностей радиоактивного распада.

Итак, когда мы наблюдаем бета-распад, нам кажется, что нейтрон состоит из протона и электрона, а протон — из нейтрона и позитрона. Какая же из этих частиц простая (элементарная) и какая сложная?

Чем больше сведений получали физики о природе и свойствах элементарных частиц, тем яснее становилось, что на этот вопрос нужно дать самый неожиданный ответ. Как протон, так и нейтрон — элементарные, т. е. простейшие, частицы. Ни тот ни другой не построены из еще более простых частиц. Но каждый из них в определенных условиях способен к превращениям, при которых возникают (или, как говорят, рождаются) новые частицы.

## МНОЖЕСТВЕННОЕ РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ

Особенно наглядно это свойство проявляется при столкновении частиц, из которых одна обладает очень большой энергией. Такие столкновения удобно изучать на специальных фотопластинках с толстым слоем эмульсии. Когда заряженная частица попадает в этот слой, она действует на него так же, как световой луч. В эмульсии после проявления виден след (или, как его называют, «трек») частицы. Можно поместить пластинку в поток частиц,

### Время жизни и период полураспада нейтрона

Все события в мире атомов и элементарных частиц (иногда говорят — в микромире) подчиняются законам теории вероятности. Так, например, если следить за одним определенным нейтроном, то нельзя предсказать точно, когда именно он распадется: это может случиться очень скоро, а может и через очень длительное время. Но если наблюдать за большим числом нейтронов, то окажется, что в среднем они распадаются за вполне определенное время после того, как освободились из атомного ядра. Это, как принято говорить, среднее время жизни нейтрона — 16,9 минуты — определено с большой точностью советскими физиками. Из математической теории вероятностей следует, что из большого числа нейтронов по истечении этого времени останется «в живых» 37%, остальные 63% распадутся. Математика позволяет сосчитать, через сколько времени из большого числа нейтронов распадется половина. Для этого среднее время жизни надо умножить на 0,693. Полученный промежуток времени называют периодом полураспада. Для свободного нейтрона он равен 11,7 минуты.

Конечно, то, что мы сейчас говорили, относится не только к нейтронам, но и к любым другим частицам. Только среднее время жизни и период полураспада у них будут совсем другие.

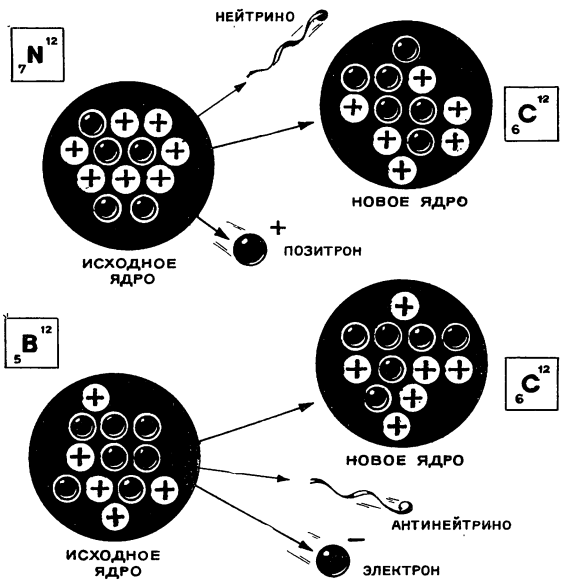



**Рис. 9. Бета-распад. Взаимопревращение ядерных протонов и нейтронов. *Наверху*: протон, превращаясь в нейтрон, испускает позитрон и нейтрино. *Внизу*: нейтрон, превращаясь в протон, испускает электрон и антинейтрино.**

идущих из мощного ускорителя, или поднять ее на большую высоту в поток космических лучей. В обоих случаях в эмульсии после проявления обнаруживаются «звезды» — пучки следов, исходящих из одной точки. В такой точке частица с очень большой энергией столкнулась с ядром одного из атомов эмульсии. Из места столкновения вылетело множество частиц, иногда вылетает несколько десятков.

Подробное исследование их следов показывает, что только немногие из этих частиц могут быть осколками разбитого атомного ядра. Большинство лучей «звезды» — это следы мезонов, частиц, которые мы наблюдаем только при столкновении частиц с высокой энергией. Они «живут» ничтожные доли секунды, а затем распадаются, претерпевая сложные превращения.

Когда частица космических лучей сталкивается в атмосфере с атомным ядром кислорода или другого газа, также происходит множественное рождение новых частиц. Рождающиеся частицы могут пройти в воздухе большой путь и, сталкиваясь с ядрами других атомов, размножаются в очень большом количестве. Получается широкий «ливень» быстрых заряженных частиц, и все они — «потомки» одной первичной частицы, передавшей им свою энергию. Подсчитав мощность ливня, можно определить энергию первичной частицы. Ученым удавалось наблюдать ливни, у которых энергия первичной частицы должна была быть в миллиарды раз больше, чем у частиц, получаемых в самых мощных ускорителях.

Расчеты показывают, что никакая частица не может набрать такую энергию в пределах нашей звездной системы — Галактики, и, видимо, такие частицы прилетают к нам из каких-то отдаленных миров — из Метагалактики.

## ЧАСТИЦЫ И ВОЛНЫ

Ученые долго спорили о природе света. Великий Ньютон считал, что свет — поток быстрых частиц, а его современник Гюйгенс, что это распространение волн. Более двух столетий большинство ученых были уверены, что Ньютон ошибся. Была создана электромагнитная теория света, и она блестяще подтвердилась опытами. По этой теории свет — это колебательные изменения силы электрических и магнитных полей, распространяющиеся в пространстве подобно волне. Такая же природа и у радиоволн, они отличаются от света лишь тем, что их колебания происходят в миллиарды раз медленнее.

Но когда стали внимательно изучать взаимодействие света с веществом, оказалось, что световая энергия может испускаться или поглощаться только определенными порциями — квантами. Так родилась новая, квантовая физика. Сначала думали, что квант — это как бы «атом энергии». Но затем выяснилось, что это не атом энергии, а частица света. Создатель теории относительности великий Эйнштейн установил, что свет — сложное явление, что он одновременно и электромагнитные волны, и поток частиц (световых квантов, или, как их назвали, фотонов). Можно, не делая никакой ошибки, рассматривать свет просто как поток фотонов, но следует помнить, что эти световые частицы обладают волновыми свойствами.

В дальнейшем квантовая физика установила, что не только фотоны, но и все остальные частицы также обладают волновыми свойствами (рис. 10). Замечательные опыты с дифракцией электронов убедительно доказали, что поток электронов в определенных условиях ведет себя как волна. Из квантовой механики — основы современной теоретической физики — следует, что всякая частица обладает волновыми свойствами. Фотон в этом смысле вовсе не исключение.

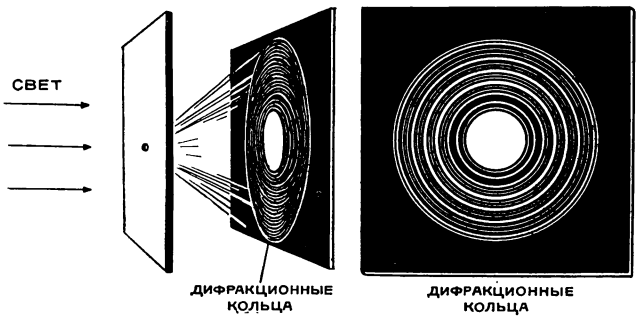



**Рис. 10. Не только фотоны, но все другие элементарные частицы обладают волновыми свойствами. Дифракция пучка электронов происходит точно так же, как и дифракция светового пучка.**

Итак, к списку известных нам элементарных частиц мы должны добавить световую частицу — фотон.

## ИСПУСКАНИЕ СВЕТА И РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ

Поскольку мы считаем фотон такой же полноправной частицей, как, например, протон и нейтрон, рождение частиц не может быть для нас удивительным. Любой фонарь или лампа испускает свет, т. е. поток фотонов, а между тем в веществе фонаря фотонов нет. Очевидно, фотоны рождаются в процессе испускания света. Как это происходит, известно из атомной физики. Атом поглощает энергию и переходит в возбужденное состояние. Затем он возвращается в основное состояние и испускает при этом световой квант, т. е. фотон (рис. 11). Теория объясняет, что рождение любой элементарной частицы происходит по тем же законам, как и испускание фотонов. Это относится, в частности, и к бета-распаду.

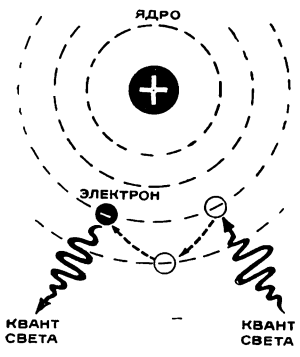



**Рис. 11. Поглощение и излучение света атомом.**

Квантовая механика рассматривает протон и нейтрон как два состояния одной и той же элементарной частицы, которую назвали нуклоном (это название означает просто «ядерная частица»). В свободном виде или в ядрах, перегруженных нейтронами, нейтрон — возбужденное состояние нуклона, а протон — его основное состояние. Напротив, в ядрах, перегруженных протонами, протон оказывается возбужденным, а нейтрон — основным состоянием.

## ТЯЖЕЛЫЕ, СРЕДНИЕ И ЛЕГКИЕ ЧАСТИЦЫ

Мы не будем перечислять все известные науке частицы, а сосредоточим внимание на их общих свойствах. По массе все частицы разделяют на три группы: барионы, мезоны и лептоны. Названия эти происходят от греческих слов «тяжелый», «средний» и «легкий».

К барионам относятся уже известные нам нуклоны — протон и нейтрон, а также частицы более тяжелые, чем нуклоны,— их называют гиперонами. К лептонам относится известный нам электрон, а также позитрон и нейтрино, о которых речь будет идти ниже.

Мезоны — частицы со средней массой: они легче нуклонов, но тяжелее электронов. Все они неустойчивы и за малые доли секунды распадаются. По массе, времени «жизни» и другим свойствам их разделяют на несколько групп: мю-мезоны (мюоны), пи-мезоны (пионы), К-мезоны.

Особняком стоит фотон, или световой квант.

Если учитывать не только массу, но и другие свойства частиц, то можно объединить гипероны и $K$-мезоны в одну группу «странных частиц», а мю-мезоны отнести к лептонам. В группе мезонов при этом остаются только пи-мезоны (пионы).

## ЧАСТИЦЫ-ВОЛЧКИ

Мы знаем, что существуют постоянные магниты и электромагниты. В электромагните течет круговой ток; он и возбуждает магнитное поле. В постоянном магните обычных токов нет. В нем магнитное поле возбуждают атомы и даже отдельные электроны, которые ведут себя как маленькие магнитики. В немагнитном веществе эти магнитики направлены беспорядочно. При намагничивании все магнитики выстраиваются в одном направлении. То, что электрон ведет себя как магнит, проще всего объяснить тем, что он вращается, как волчок, вокруг своей оси. Ведь вращающийся заряд — все равно как круговой ток. Любое заряженное тело при вращении становится магнитом. Кстати, и многие другие свойства элект-

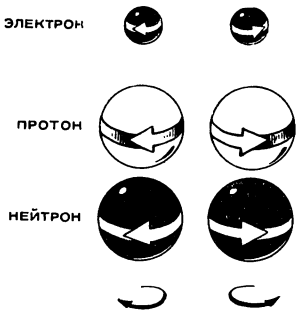



Рис. 12. У большинства элементарных частиц есть спин.

рона объяснимы только тем, что он вращается вокруг своей оси.

Но электрон нельзя считать телом с определенными размерами и определенной формой. Вращение электрона вокруг своей оси совсем не то же самое, что вращение тела с определенными размерами и формой.

Для этого свойства электрона придумали специальное название — «спин». Спином обладают также протоны, нейтроны и многие другие из элементарных частиц. Такую частицу следует представлять себе как волчок, который может вращаться вокруг своей оси по часовой стрелке или против ее направления (рис. 12). Но есть частицы и не обладающие спином. Таковы, например, пи-мезоны.

## ЧАСТИЦЫ И АНТИЧАСТИЦЫ

Мы уже говорили о позитроне. Эта частица очень похожа на электрон, но только «вывернутый наизнанку». Если то или иное свойство частицы можно выразить числом, то величины этих чисел у электрона и позитрона всегда точно одинаковы. Но если у числа может быть знак (положительный или отрицательный), то у электрона и позитрона эти знаки обязательно противоположны. Масса электрона ничем не отличается от массы позитрона — масса ведь не может быть отрицательной. Электрический заряд у электрона отрицательный, у позитрона — положительный, но величины зарядов равны. Позитрон во всем, в чем только возможно, противоположен электрону. Его можно бы было назвать «противоэлектроном» или, по-гречески, «антиэлектроном».

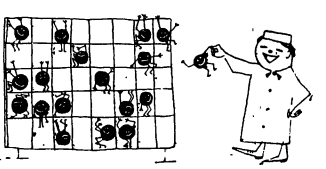
Теоретическая физика предсказала и существование позитрона, и то, что у других частиц тоже должны быть античастицы, у которых те же свойства, только с обратным знаком. Это предсказание блестяще подтвердилось, когда были открыты антинуклоны, т. е. антипротоны и антинейтроны.

Частица и античастица похожи и в то же время не похожи друг на друга, как перчатки с правой и левой руки или как предмет и его зеркальное отображение. Но ведь бывают симметричные предметы: гладкий шар, например, невозможно отличить от его зеркального отображения. Нечто подобное существует и в мире элементарных частиц. Известны две симметричные частицы: фотон (световой квант) и нейтральный пи-мезон. У них нет античастиц, или, точнее, каждая из них совпадает со своей античастицей. У всех остальных известных ученым частиц есть «зеркальные отображения» — античастицы.

### На переднем крае науки

В г. Дубне, под Москвой, где находится Объединенный институт ядерных исследований, летом 1964 г. состоялась международная конференция по физике высоких энергий. На ней обсуждались самые последние идеи в физике элементарных частиц, то, что еще окончательно не доказано, о чем сейчас еще спорят. Особое внимание участников конференции было привлечено к вопросу о том, как свойства частиц связаны со свойствами самого пространства и времени. Было рассказано о некоторых опытах, в которых как будто «правое» отличалось от «левого» независимо от разницы между частицей и ее античастицей. Подтверждение этих опытов будет означать «нарушение временной четности» и, быть может, приведет к изменению наших взглядов на самые основные свойства пространства и времени.

Рассматривался вопрос о системе элементарных частиц. В последние годы физики открыли много частиц с очень коротким временем «жизни». Такие частицы, распадающиеся едва лишь они успели образоваться, называют резонансными частицами или просто «резонансами». Недавно считали, что существует 30 разных видов частиц, теперь число их вместе с резонансными оказалось уже больше 100. Чтобы навести порядок в этом множестве частиц, стараются уложить их в систему, которая более или менее напоминает периодическую систему химических элементов Менделеева. И подобно тому как Менделеев с помощью системы элементов предсказал свойства еще тогда неизвестных элементов, новая система элементарных частиц позволила предсказать свойства частицы «омега минус». Предположение потом уже подтвердилось на опыте. В этой системе считается, что целый ряд элементарных частиц — это возбужденные состояния одной по существу частицы, которые можно уподобить возбужденным состояниям атома. Некоторые теоретики делают отсюда довольно неожиданный вывод, что нет глубокой разницы между такой заведомо сложной частицей, как атом, и такими, казалось бы, «простыми», как элементарные частицы. Эти ученые предлагают вообще отказаться от названия «элементарные» и называть эти частицы фундаментальными, т. е. основными. Но решение этих вопросов — дело будущего.



Как мы уже говорили, всякое число, у которого может быть положительный или отрицательный знак, должно иметь противоположные знаки для частиц и античастиц. Теория приводит к еще более поразительному выводу. Оказывается, сами частицы и античастицы ведут себя подобно положительным и отрицательным числам в алгебре: прибавить античастицу — это то же самое, что отнять частицу. В алгебре сложение положительного и отрицательного чисел равной величины дает в результате нуль. Подобно этому частица с античастицей при столкновении как бы уничтожаются, или, как говорят, аннигилируют.

Слово «уничтожаются» надо понимать в том смысле, что после столкновения не остается частиц того же вида. Но ни масса, ни энергия частицы и античастицы не исчезают. В результате аннигиляции образуются более легкие частицы, уносящие с собой всю энергию, которая была скрыта в первоначальных частицах. Энергия, выделяющаяся при аннигиляции, громадна. Это самый мощный источник энергии, известный науке. Если бы удалось поставить его на службу человеку, то он был бы в тысячи раз мощнее атомной или водородной бомбы при том же весе вещества, дающего энергию.

Очень интересно фантазировать о том, существует ли где-нибудь во Вселенной антивещество. Быть может, есть целые «антимиры», построенные целиком из антивещества. Если даже мы их и видим, все равно не можем отличить «мир» от «антимира»: ведь свет состоит из фотонов, а фотон ничем не отличается от «антифотона».

«Антимир» должен быть зеркальным отражением нашего мира, и если то, что у нас сердце слева, не простая случайность, у «антилюдей» сердце должно быть справа. Вместо электронов в «антимире» — позитроны, вместо нуклонов — антинуклоны, но жители «антимира» не могут этого заметить. Они могли бы понять, что они «антилюди», если их «антимир» столкнулся бы с нашим миром, а тогда произошел бы взрыв колоссальной силы. Все это пока лишь фантазия: антивещество, несомненно, существует, но, насколько оно распространено в природе, наука еще не знает.

Отдельные античастицы образуются при столкновении частиц, обладающих очень высокой энергией. Чем тяжелее античастица, тем более высокая энергия нужна, чтобы ее получить. Прежде всего ученые обнаружили легкую античастицу — позитрон. Ее удалось наблюдать в космических лучах. Теперь физики научились получать различные античастицы, вплоть до самых тяжелых — антигиперонов. Для этого ударяют из мощного ускорителя потоком частиц по какой-либо мишени. При этом античастицы рождаются всегда попарно с частицами. Образующиеся античастицы очень быстро аннигилируют с окружающим веществом, но физики успевают заметить их по следам, которые те оставляют на фотографической пластинке.

К сожалению, современная техника еще бесконечно далека от возможности получить практически измеримое количество антивещества. Тем более неясно, как можно было бы отделить античастицы от рождающихся вместе с ними частиц. Если бы у нас в руках было антивещество, возникла бы интересная и нелегкая задача: сохранить его от аннигиляции с обычным веществом. Для решения этой задачи можно уже теперь указать разумные пути.

## «ОТШЕЛЬНИКИ» И «ОБЩЕСТВЕННИКИ»

Мы ознакомились с некоторыми подразделениями в мире элементарных частиц: частицы и античастицы, барионы, мезоны и лептоны. Физики разделяют частицы еще на две важные группы.

Частицы первой группы называются ферми-частицами или фермионами (по имени ученого Энрико Ферми, который объяснил их свойства). Это «частицы-отшельники»: в группе таких частиц в определенном состоянии может находиться только одна частица. К ферми-частицам относятся все внутриатомные частицы: электроны и нуклоны (протоны и нейтроны). Все это «частицы-волчки», т. е., выражаясь по-ученому, они обладают спином. Два электрона не могут вращаться в атоме по одной и той же орбите и с одинаковым направлением спина (этот закон называется принципом Паули). Это и значит, что электроны относятся к ферми-частицам [1].

Иногда приходится иметь дело с большим количеством ферми-частиц, свободно движущихся в пространстве. Они образуют своего рода газ, который называется ферми-газом. Частицы в таком газе не могут двигаться с одинаковой скоростью, т. е. иметь одинаковую энергию. Тогда бы они находились в одинаковом состоянии, что для ферми-частиц «запрещено».

[1] Иногда то же самое выражают определением: «Электроны подчиняются статистике Ферми—Дирака».

Частицы ферми-газа продолжают двигаться до абсолютного нуля, т. е. у его частиц сохраняется кинетическая энергия, и притом тем большая, чем больше плотность газа.

При сжатии ферми-газа его частицы как бы выжимаются на более высокие уровни энергии. Это явление происходит, в частности, с электронами в металлах. В атоме металла электроны так слабо связаны, что некоторые из них уже не могут «поместиться» на своих орбитах. Эти электроны оторваны от атомов и образуют внутри металлического предмета свободный электронный газ, обладающий свойствами ферми-газа. Именно эти электроны и переносят электрический ток.

Есть среди элементарных частиц и такие, которые обладают прямо противоположными свойствами: они стремятся находиться вместе в одном и том же состоянии. Такие «частицы-общественники» называются бозе-частицами или бозонами [1] — опять-таки по имени физика (Шатьендраната Бозе), который теоретически объяснил их поведение. К бозе-частицам относятся прежде всего световые кванты, или фотоны, а из неустойчивых частиц — пи-мезоны.

## НЕУЛОВИМАЯ ЧАСТИЦА

Когда физики более внимательно изучили радиоактивный бета-распад, при котором нейтрон может превратиться в протон и электрон, а протон — в нейтрон и позитрон, оказалось, что в процессе распада испускается и еще одна частица, но она почти неуловима. Она совершенно беспрепятственно пролетает через такую толщу вещества, как вся наша Земля, как Солнце или любое известное небесное тело

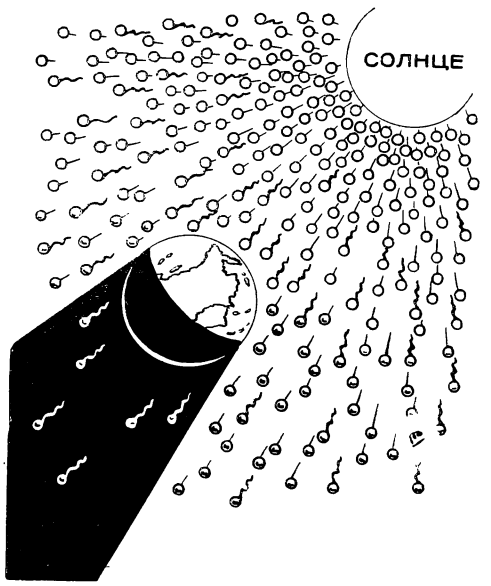



**Рис. 13. Неуловимая частица — нейтрино — свободно проникает сквозь толщу земного шара.**

(рис. 13). Эта частица почти не взаимодействует с веществом. Отсюда заключили, что у нее нет, в частности, электрического заряда, и ее назвали нейтрино. Это слово по-итальянски значит «нейтралочка», т. е. очень маленькая нейтральная частица.

Про нейтрино говорят, что эта частица была открыта «на кончике пера у теоретика». Физики, как строгие бухгалтеры, старались свести баланс энергии при бета-распаде. Но баланс никак не сходился: часть энергии «исчезала» неведомо куда. Пришлось предположить, что какой-то неуловимый «вор» уносит энергию. Эта малопочтенная роль и была «поручена» нейтрино. Десятка два лет новая частица оставалась неуловимой. В конце концов физикам все же удалось ее «поймать». Для этого пришлось затратить немало труда.

[1] Иногда о них говорят, что они «подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна».

### Свойства частиц и свойства пространства-времени

**Физики особенно интересуются теми свойствами частиц, которые связаны с симметрией, потому что симметрия может быть присуща не частицам, а самому пространству, в котором они существуют и которое по теории относительности тесно связано со временем. Из очень общих соображений ученые предположили, что в законах природы не должно быть разницы между «правым» и «левым». Отсутствие такой разницы назвали сохранением четности. Затем опыт показал, что при бета-распаде четность не сохраняется, т. е. «правое» отличается от «левого». Сначала думали, что причина в свойствах самого пространства. Но оказалось, что различие между «правым» и «левым» проявляется только в тех процессах, где участвуют нейтрино. Тогда решили, что причина не в свойствах пространства, а в свойствах нейтрино. Отсюда и сделали вывод, что эта частица подобна винту. Она всегда движется и как бы ввинчивается в пространство. Но чтобы этот вывод был справедлив, нужно, чтобы различие между «правым» и «левым» было связано с различием между частицей и античастицей. То, что «правое» для частицы, должно быть «левым» для античастицы, и наоборот. Проверить этот вывод на опыте — самая увлекательная задача для физиков. Если он не всегда будет подтверждаться, то теория говорит, что причина должна быть уже в свойствах времени—в так называемом нарушении временной четности.**

**Рис. 14. У нейтрино и антинейтрино различный спин: они вращаются в противоположные стороны.**

Сейчас уже довольно много известно о свойствах нейтрино. Это ферми-частица, и у нее есть спин. Но, по современным представлениям, нейтрино правильнее сравнить не с волчком, а с винтом. Насколько нам известно, частица нейтрино подобна фотону в том отношении, что ее нельзя остановить: она всегда движется со скоростью света. При этом она как бы ввинчивается в пространство.

Когда физикам удалось «поймать» нейтрино, было сделано важное открытие: оказалось, что, кроме нейтрино, существует еще и антинейтрино, только эти частицы очень трудно отличить друг от друга (рис. 14). Нейтрино испускается во всех процессах, где рождается позитрон или поглощается электрон, антинейтрино — при испускании электрона или поглощении позитрона. Следовательно, антинейтрино испускается при распаде нейтрона.

Чем же нейтрино и антинейтрино отличаются друг от друга? Ведь античастица должна быть зеркальным отражением частицы, а у нейтрино как будто нечему и «отражаться». Ответ был найден, когда установили, что эти частицы винтообразны. Одна из них ввинчивается в пространство, как правый, другая — как левый винт.

Одна из интереснейших, но и труднейших задач для физиков и астрономов — «поймать» нейтрино неземного происхождения. Прежде всего нужно измерить поток нейтрино от Солнца. Это даст прямые указания на то, какие ядерные реакции происходят в Солнце и звездах. Интересно, что солнечные нейтрино нужно «ловить» ночью: ведь Земля для них не препятствие, а другие солнечные излучения, мешающие измерениям, она задержит. Если удастся изучить нейтрино, приходящие к нам на Землю из глубин космического пространства, мы узнаем много нового о Вселенной в целом.

## КВАНТОВАНИЕ ПОЛЕЙ И ПИ-МЕЗОНЫ

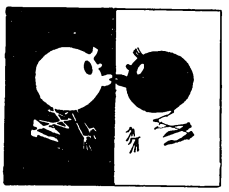
Свет, как мы уже знаем,— это распространяющаяся электромагнитная волна, т. е. колебательный процесс в электромагнитном поле. Свойства волны должны быть связаны с общими свойствами электромагнитного поля. Отсюда теоретики пришли к выводу, что всякое электрическое и магнитное взаимодействие переносится фотонами. Если два заряженных тела притягиваются или отталкиваются — это происходит оттого, что они обмениваются фотонами. Раньше мы называли фотоны световыми квантами, но правильнее их называть квантами электромагнитного поля.

Вероятно, и любые другие взаимодействия (как говорят физики, поля́) переносятся частицами. На таком предположении построена теория квантовых полей, в которой частицы, переносящие взаимодействие, называются квантами поля.

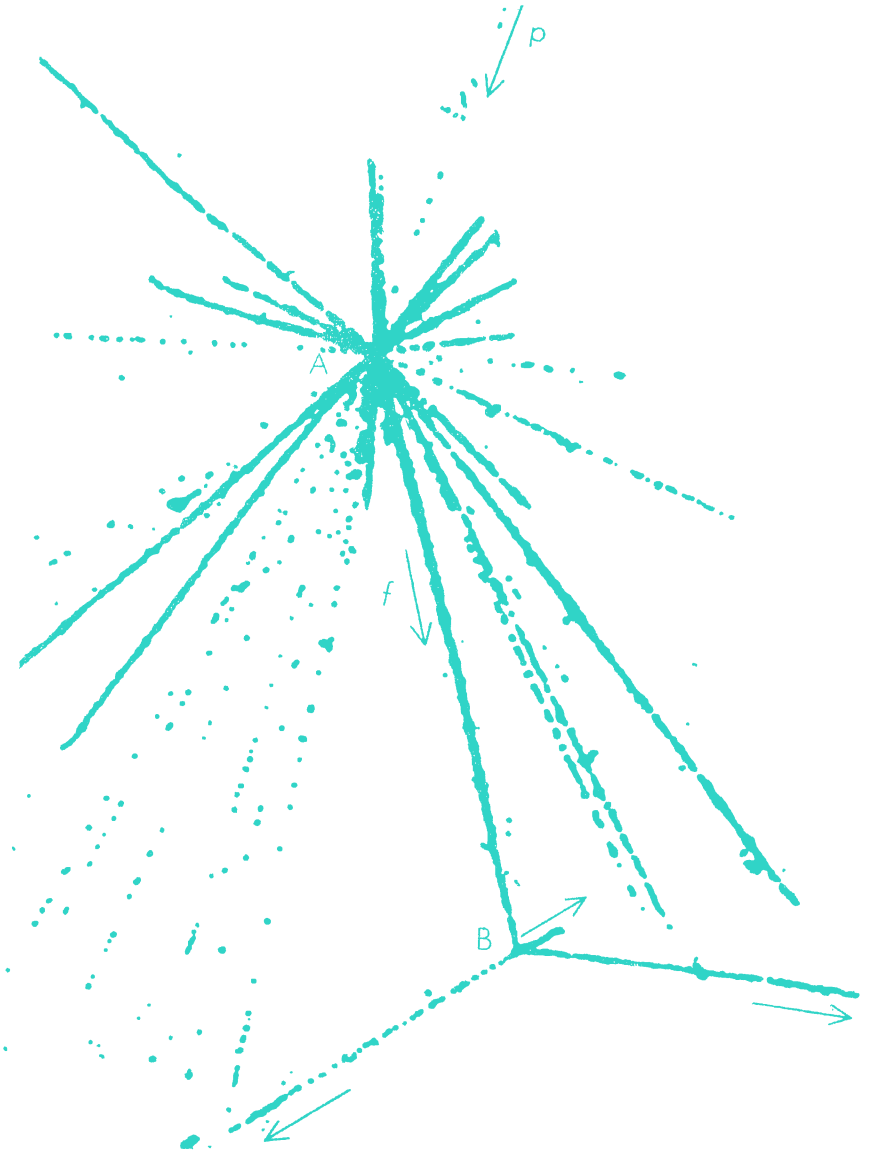
Ядра атомов состоят из нуклонов (протонов и нейтронов), которые очень крепко связаны ядерными силами. Физики-теоретики попытались квантовать ядерные силы, т. е. объяснить их как обмен нуклонов какими-то частицами. Расчеты показали, что масса таких частиц должна лежать посередине между массами нуклона и электрона; предполагаемые частицы назвали мезонами (что значит «средние»). Затем

### Нейтрино и антинейтрино

Еще совсем недавно физики обнаружили, что при бета-распаде теряется часть энергии, и объяснили это тем, что часть энергии уносится частицей, которую трудно обнаружить. Эту частицу и назвали нейтрино. С помощью очень тонких и трудных опытов установили, что частицы нейтрино не одинаковы. Сейчас известны четыре вида нейтрино. За одним из них сохранили первоначальное название, другой вид — античастицу первого — назвали антинейтрино и, кроме того, нашли, что при распаде мю-мезонов (мюонов) испускается еще два вида частиц с близкими свойствами. Хотя за одним из этих четырех видов частиц закрепили название нейтрино, но до сих пор это же название часто применяют и ко всем четырем видам.



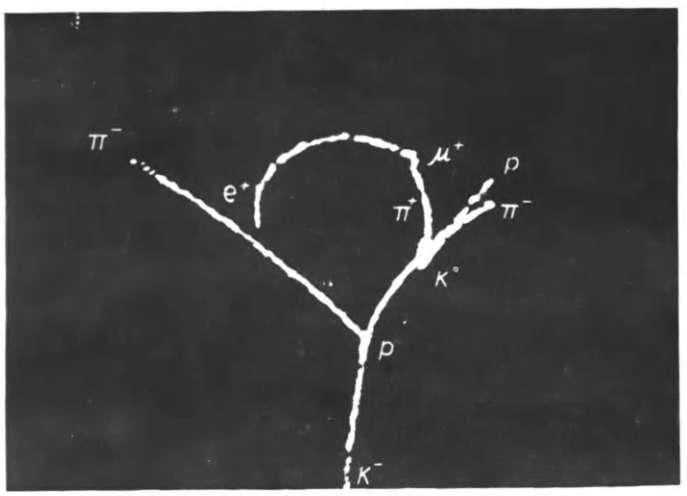
**Фотография электронно-фотонного «ливня».**



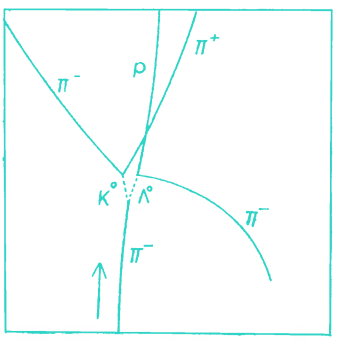

**На этом снимке показано, как ядерные частицы оставляют свои следы в эмульсии фотопластинки. Протон *p*, прилетевший к нам в составе космических лучей, столкнулся с ядром атома серебра и выбил из него целую «звезду», состоявшую из различных частиц. Одна из этих частиц — *f* — так называемый гиперфрагмент — содержит в своем составе гиперон. В точке *B* гиперфрагмент распался на три заряженные частицы и несколько нейтронов (нейтроны на снимке не видны, так как они не оставляют следы). Снимок получен в Варшаве польскими физиками Марианом Даныш и Ежи Пневским в 1952 г. В этой их работе были впервые обнаружены гиперфрагменты — атомные ядра, содержащие в своем составе гипероны.**

На верхней фотографии — следы частиц в пузырьковой камере. Частица, проходя через готовую закипеть жидкость, вызывает вдоль своего пути образование пузырьков (кипение). На нижней фотографии — выбраны из той же картины наиболее важные следы и переведены на экран специального проектора.

Отрицательный $K$-мезон вылетает снизу и сталкивается с протоном $p$. Из места столкновения вылетают: нейтральный $K$-мезон, протон $p$ и отрицательный $\pi$-мезон. Нейтральный $K$-мезон следы не оставляет, но пролетев около 10 *см*, распадается на пару $\pi$-мезонов: на положительный $\pi^+$ и отрицательный $\pi^-$. Отрицательные частицы заворачиваются магнитным полем вправо, положительные — влево. Через стомиллионную долю секунды положительный $\pi^+$-мезон распадается на положительный $\mu^+$-мезон и нейтрино. Положительный $\mu^+$-мезон пролетает около 1 *см* и останавливается, а через миллионную долю секунды распадается на позитрон $e^+$, нейтрино и антинейтрино. На снимке большая дуга сверху — путь позитрона $e^+$.




$p$ протон
$\pi^+$ положительный $\pi$-мезон
$\pi^-$ отрицательный $\pi$-мезон
$\Lambda^\circ$ нейтральные ламбда-частицы
$K^\circ$ нейтральный $K$-мезон
$e^+$ позитрон



Рождение и распад $K$-мезона и $\lambda$-гиперона. Слева показана схема этого «события» и пояснены обозначения частиц.

частицы средних масс нашли в космических лучах, а позднее научились получать их искусственно с помощью ускорителей.

Первые найденные мезоны очень слабо взаимодействовали с ядрами. Эти частицы сейчас называют мю-мезонами. Они очень похожи на электроны, только примерно в 200 раз тяжелее. Истинными квантами ядерного взаимодействия оказались другие частицы, которые назвали пи-мезонами. Они бывают положительными, отрицательными и нейтральными. Нейтральный пи-мезон, как и фотон, неотличим от своей античастицы.

Ядерное взаимодействие очень сильно. Следовательно, нуклоны беспрерывно испускают и поглощают большое количество пи-мезонов; нуклоны окружены мезонным облаком, как говорят, «мезонной шубой». Именно поэтому даже нейтрон ведет себя как магнитик. Сам по себе нейтрон не имеет электрического заряда, но его «мезонная шуба» состоит из заряженных мезонов, и, так как нейтрон обладает свойствами волчка, в этой «шубе» текут круговые токи (рис. 15). При аннигиляции нуклона и антинуклона они превращаются в основном в пи-мезоны.

* * *

Мы рассказали кое-что, но далеко не все, что известно науке об элементарных частицах.

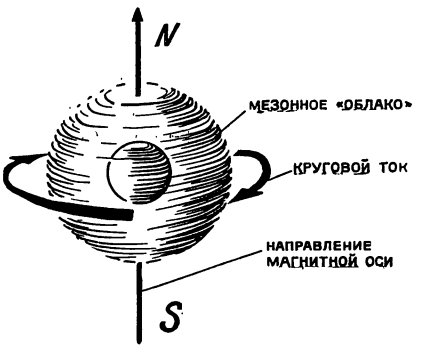



**Рис. 15. Нейтрон непрерывно испускает и поглощает мезоны, образующие вокруг него мезонное облако. Текущие в этом «облаке» токи и придают нейтрону магнитные свойства.**

С непривычки было бы трудно понять, почему частицы и античастицы рождаются попарно и каким образом пустое пространство (вакуум) может считаться неисчерпаемым резервуаром частиц и античастиц

Физика элементарных частиц — самая многообещающая и быстро развивающаяся, но и одна из самых трудных отраслей современной физики. Чтобы разобраться в ней хорошо, нужно многое знать из других разделов физики и из математики Надеемся, что нашим читателям захочется узнать об элементарных частицах больше, чем здесь написано. А для этого надо много и упорно учиться. ■

### Превращение фотона

**Световые кванты достаточно большой энергии могут превращаться в электрон-позитронную пару. При этом фотон исчезает, и вместо него рождаются две частицы: электрон и его античастица — позитрон. Очень интересно и образно охарактеризовал это явление замечательный советский физик академик Вавилов: «Перед нашими глазами разыгрывается необыкновенное зрелище преобразования светового гамма-кванта в пару легких частиц вещества. Происходит нечто действительно до известной степени напоминающее сказочное превращение мелодии в скрипку».**

# РОЖДЕНИЕ, ЖИЗНЬ И СМЕРТЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

О радиоактивности написаны десятки тысяч статей и сотни книг. Открытие этого явления — одно из величайших в истории науки.

Алхимики пытались осуществить превращение элементов, из обычного свинца получить благородное золото. Время развеяло в прах их наивные верования. В XIX столетии только безнадежные упрямцы еще думали, что из одного элемента можно получить другой. В науке считалось неоспоримым, что атом неделим.

А между тем в мире химических элементов течет своя, очень своеобразная и далеко не

совсем понятная жизнь. Во Вселенной умирают одни атомы, другие рождаются. Идет великий круговорот элементов.

Первым, кто доказал, что атомы химических элементов могут изменяться, был французский ученый Анри Беккерель.

## УРАНОВЫЕ ЛУЧИ

В ноябре 1895 г. немецкий физик Конрад Рентген открыл загадочные лучи, которые теперь весь мир называет **рентгеновскими**, или «Х-лучами» (рис. 1). Исследователи пытались определить, как и почему эти лучи испускаются. И в частности, они полагали, что рентгеновским излучением может сопровождаться фосфоресценция — холодное свечение некоторых веществ. Подвергнутые действию солнечного света, такие вещества сохраняют затем определенное время способность самопроизвольно светиться. Быть может, фосфоресцирующие вещества сами служат источниками рентгеновского излучения? Это и решил проверить Анри Беккерель.

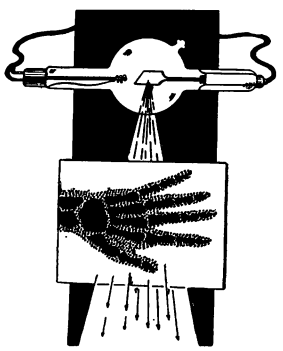


Рис. 1.

Среди фосфоресцирующих веществ высокой активностью отличалась двойная сернокислая соль урана и калия — своеобразные урановые квасцы. Если фосфоресценция действительно сопровождается рентгеновским излучением, то образцы соли должны оставить отпечатки на фотопластинке, завернутой в черную бумагу. Ведь проникающая способность «Х-лучей» хорошо известна. Так рассуждал Беккерель. И его идея вскоре подтвердилась. Он мог заявить на конференции Парижской академии наук, что фосфоресцирующие вещества действительно испускают лучи Рентгена.

Но как серьезный ученый он продолжал свои исследования. Однажды (это было в конце февраля 1896 г.) он все подготовил для опыта, но солнце в тот день так и не появилось на парижском небе, и его лучи не могли вызвать фосфоресценцию у урановой соли.

Оставалось дожидаться ясной погоды. Через несколько дней Беккерель, щурясь от весеннего солнца, распахнул окно своей лаборатории. Но прежде чем выставлять на свет новую пластинку, он решил проявить старую, ту самую, которая пролежала несколько дней в ящике стола, завернутая в черную бумагу, под образцами урановой соли.

На негативе обнаружились темные пятна, в точности соответствовавшие форме и положению образцов урановой соли. А ведь эти образцы предварительно не освещались, как в предыдущих опытах ученого.

Так, в 11 часов утра 1 марта 1896 г. было открыто новое явление. Урановая соль испускала лучи неизвестного типа. Они во многом были похожи на рентгеновские: проходили через плотную бумагу, дерево, тонкие металлические пластинки. Они делали воздух проводником электричества, так же как и лучи Рентгена. Но все-таки это были не рентгеновские лучи. Рентгеновские лучи могли отражаться и преломляться; лучи Беккереля этим свойством не обладали. Поставив много опытов, Беккерель доказал, что источник его лучей — элемент уран. И назвал лучи урановыми.

Элемент уран оказался не единственным, способным испускать новые лучи. Соотечественники Беккереля Пьер и Мария Кюри из десятков тонн руды выделили миллиграммы неизвестных ранее элементов — полония и радия. Эти элементы также испускали «урановые» лучи. И аналогичные свойства исследователи обнаружили у тория.

Лучи, открытые Беккерелем, стали называть **радиоактивными** (от латинского слова «радиус», что означает «луч»), а само явление их испускания — **радиоактивностью**.

Четыре важных вывода сделали ученые в самом начале XX века. Они доказали, что радиоактивность — свойство атома. Было установлено, что радиоактивные элементы — уран, радий, полоний, актиний, торий — встречаются в земных минералах все вместе. Оказалось, что радиоактивность — явление постоянное и не ослабевает со временем. И, наконец, ученые выяснили, что радиоактивное излучение неоднородно и состоит из нескольких сортов лучей.

## ПОЛШАГА ДО ОТКРЫТИЯ

Радиоактивность могла быть открыта раньше. Но ее значение ученые не поняли бы. Так, собственно, и случилось за 30 лет до работы Анри Беккереля.

В 1868 г. Парижская академия наук предоставила свою трибуну Ниепсу де Сен-Виктору.

Скромный естествоиспытатель, занимавшийся изучением фотографических процессов, отнюдь не жаждал славы. Он без всяких претензий доложил высокому собранию свой мемуар «О новых действиях света». В нем он рассказывал, как различные виды света действуют на фотографическую пластинку.

Ниепс де Сен-Виктор проделал много опытов, в том числе и с фосфоресцирующими веществами. И среди этих веществ была двойная сернокислая соль урана и калия. Ее призрачное бледно-зеленое свечение заставляло темнеть пластинку, даже если пластинка была обернута в черную бумагу.

Ученые довольно равнодушно выслушали рассуждения Ниепса о некоем новом сорте световых лучей, которые проходят сквозь плотную бумагу. Сообщение исследователя было напечатано, пожалуй, лишь из соображений этики. Напечатано — и забыто!

Точно так же прошли незамеченными аналогичные опыты Арнодона, безвестного химика из Лиона.

А ведь этим неудачникам оставалось сделать полшага до открытия радиоактивности. Эпоха «лучевой лихорадки» еще не наступила. Она началась лишь после того, как Рентген обнаружил «Х-лучи». Открывать новые лучи с этой поры стало своеобразной модой. Дух времени в какой-то мере облегчил задачу Беккереля.

## ТРИ ВИДА ЛУЧЕЙ

Природа рентгеновских лучей проста: это электромагнитные колебания с малой длиной волны. Иное дело — природа радиоактивных излучений. Когда их подвергли действию электрического поля, они разделились на два потока, отклонявшихся в разные стороны. Это означало, что у одной их части положительный, а у другой—отрицательный электрический заряд. Их поместили в магнитное поле. И снова ученые обнаружили их неоднородность.

Стало быть, радиоактивное излучение представляло собой поток частиц, притом с разными массами: одни — тяжелее, другие — легче. На страницах научных журналов появились новые термины: **α-излучение и β-излучение; α-частицы и β-частицы.**

Скоро был обнаружен третий компонент радиоактивного излучения. На сей раз—настоящие лучи. Они были подобны рентгеновским, только их проникающая способность оказалась

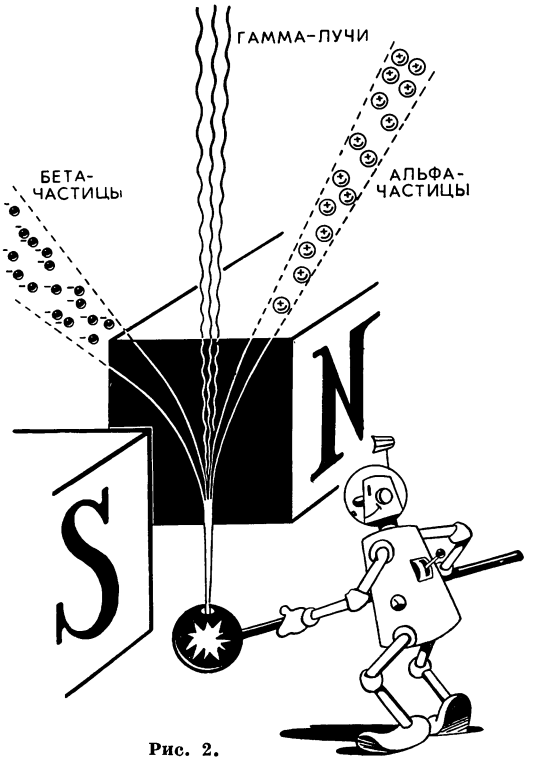



Рис. 2.

значительно выше. Их назвали **γ-лучами** (рис. 2).

Итак, при радиоактивном распаде атома из него выбрасываются две материальные частицы разной массы (альфа и бета) и испускаются лучи (гамма). Правда, одним элементам свойственно только α-излучение; другим — только β-излучение. Радий представлял собой классический α-излучатель, а его правый сосед по таблице Менделеева — актиний — испускал только β-частицы.

## МЕТАЛЛ=ГАЗ+ГАЗ

Такое не могло присниться даже самым фанатичным алхимикам. Маленькая крупинка серебристого металла радия, несравненно более редкого и дорогого, чем золото, таяла. Со временем она могла совершенно исчезнуть. Материя как бы обращалась в ничто.

Но ведь материя не может пропадать бесследно. Значит, радий в ходе своего радиоактивного распада превращается в какое-то другое вещество.

Ученые раскрыли тайну α-частицы. Они измерили ее электрический заряд. Он оказался

равным двум, если за единицу заряда считать заряд электрона. Два положительных электрических заряда уносила с собой α-частица. Ученые рассчитали ее массу; оказалось, что альфа-частица в четыре раза тяжелее атома водорода. А раз так, то альфа-частица не может быть чем-либо иным, как атомом ближайшего к водороду элемента гелия, у которого недостает двух электронов, и потому его положительный заряд равен +2. Итак, из радия испускается гелий. Во что же превращается сам радий?

Наука о превращениях химических элементов имеет свою символику, которая позволяет записывать уравнения ядерных реакций. Справа вверху от символа элемента пишется его атомный вес, слева внизу — порядковый номер (заряд ядра). Например, $_{88}Ra^{226}$. Так можно изобразить изотоп любого элемента. В данном случае индекс «226» — это массовое число одного из изотопов радия. Альфа-частица может быть записана на языке ядерной физики как $_{2}He^{4}$. Итак, $_{88}Ra^{226} - {}_{2}He^{4} = ?$

Атом радия теряет два заряда (88—2=86) и уменьшает свою массу на 4 единицы (226—4=222). Следовательно, радий превращается в какой-то элемент с зарядом 86 и атомным весом 222, т. е. $_{86}X^{222}$.

В 1900 г. английский ученый Эрнест Резерфорд впервые доказал образование нового элемента при радиоактивном распаде радия. Он назвал его радоном. В периодической системе радон (Rn) занял место в группе инертных газов (рис. 3).

Следовательно, ядерную реакцию радиоактивного распада радия можно записать так:

$$_{88}Ra^{226} - {}_{2}He^{4} = {}_{86}Rn^{222}.$$

Природа бета-частицы оказалась проще. Ученые признали ее полное сходство с электроном, частицей, несущей отрицательный электрический заряд. Актиний, испуская β-частицу, превращается в торий. При этом он сохраняет массу (потому что масса электрона очень мала), но заряд атома увеличивается на 1:

$$_{89}Ac^{227} - e^{-} = {}_{90}Th^{227}.$$

Такую схему радиоактивного распада предложили Эрнест Резерфорд и его сотрудник Фредерик Содди.

Радон и торий, получающиеся в рассмотренных нами реакциях распада, не остаются неизменными. Они в свою очередь распадаются. Радон-222 испускает альфа-частицу и превращается в полоний-218. Торий-227 также выбрасывает α-частицу и становится радием-223. Цепочки радиоактивных распадов оказались сложными и запутанными. Ученым предстояло разобраться в них. Ясно было одно: радиоактивный распад представляет собой процесс превращения элементов, происходящий независимо от воли человека.

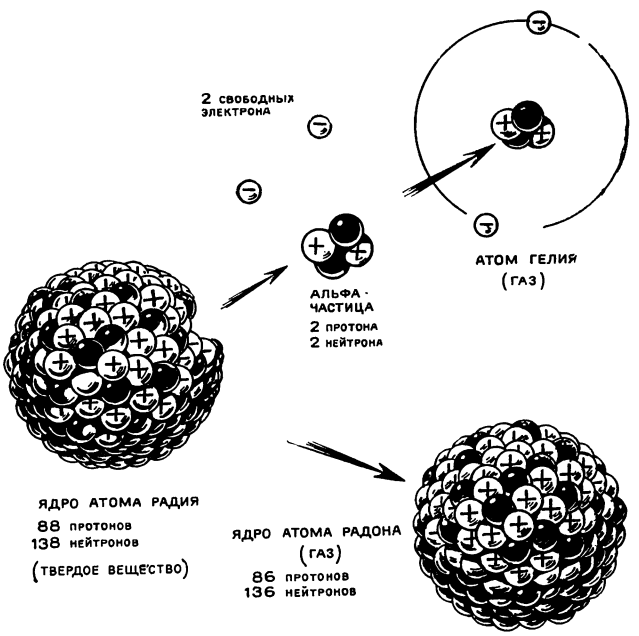



**Рис. 3. Схема радиоактивного распада ядра атома радия.**

## УПОРЯДОЧЕННЫЙ ХАОС

Радий, распадаясь, рождает «эманацию»* (радон). Ученые изучили продукты радиоактивного превращения тория и среди них нашли газ, который ничем не отличается от радона. Актиний тоже выделяет «эманацию», и она как две капли воды похожа на радон. Все эти три вида «эманации» различаются только весом их атомов. И, добавим, своими радиоактивными характеристиками.

Уже не один, а целых три инертных газа претендовали на 86-ю клетку таблицы Менделеева.

За короткий срок ученые открыли более 30 самостоятельных радиоактивных веществ. Каждое из них предлагали считать за отдельный элемент. Однако таблица Менделеева располагала лишь восемью свободными вакансиями,

* Эманация по-латински—«истечение».

восемью клетками. Например, три радиоактивных вещества (их назвали уран-икс, ионий и радиоторий) химически были совершенно неразличимы и не имели никаких отличительных черт по сравнению с обычным торием. На клетку 90 периодической системы обрушилась неожиданная беда. Четыре элемента-близнеца предъявили на нее одинаковые права. Пришлось отказаться от старых представлений, что все атомы данного химического элемента однородны.

**Рис. 4. Явление изотопии свойственно не только радиоактивным, но и всем прочим элементам таблицы Менделеева. На этом рисунке изображено, как устроены три изотопа первого элемента — водорода: протий, дейтерий (они стабильны) и тритий (он радиоактивен с периодом полураспада около 12 лет).**

«Они неоднородны!— заявили ученые Фредерик Содди и Казимеж Фаянс в 1913 г.—У каждого радиоактивного элемента может быть несколько сортов атомов. У них одинаковый заряд, они обладают одними и теми же свойствами и отличаются друг от друга только величиной атомных весов».

Такие разновидности атомов Содди и Фаянс назвали изотопами (рис. 4). Это был первый шаг к упорядочению хаоса в представлениях о мире радиоактивных элементов. Все три «эманации» могли спокойно располагаться теперь в клетке 86 периодической системы, нисколько не нарушая ее основы. Таким же путем разместились и изотопы других радиоактивных элементов.

Уже в первые годы изучения радиоактивности исследователи пытались выяснить, подчиняются ли разнообразные цепочки радиоактивных превращений какой-то системе или же они безнадежно запутаны. И здесь понятие об изотопах внесло ясность. Оказалось, что разные цепочки отдельных радиоактивных распадов могут быть сплетены в длинные цепи, у которых есть вполне определенное начало и столь же определенный конец. И все изотопы радиоактивных элементов — звенья той или иной цепи. Эти цепи называют теперь **радиоактивными семействами,** или рядами радиоактивных превращений. Иногда такое семейство называют поэтическим словом: радиоактивное «древо».

Корни, из которых произрастают эти «древа», т. е. родоначальники радиоактивных семейств,— это изотопы урана и тория: торий-232, уран-235, уран-238. В конце длинных цепочек альфа- и бета-превращений находятся устойчивые (стабильные) изотопы свинца (см. вкладку между стр. 288—289).

Массовые числа всех изотопов, входящих в семейство тория, делятся без остатка на 4. Поэтому ториевое семейство иногда обозначают как «$4n$-семейство». Аналогичным образом семейства урана-238 и урана-235 будут «$4n + 2$»- и «$4n + 3$»-семействами, так как при делении массовых чисел их изотопов на 4 соответственно получается в остатке 2 и 3.

Таков был второй шаг, превративший хаос в представлениях о радиоактивных элементах в строгий порядок. Но радиоактивность продолжала озадачивать ученых трудными за-

## О теории и практике в науке

**Когда Марии Кюри, после долгих лет трудной и самоотверженной работы, удалось наконец получить радий в чистом виде, она поспешила поделиться своей радостью с отцом — скромным учителем физики в Варшаве. В ответном письме отец написал Марии Кюри:**

**«Наконец ты владеешь солями чистого радия! Если принять во внимание, сколько потрачено труда, чтобы добыть его, то, конечно, это самый дорогой из химических элементов. Жаль одного, что работа эта имеет интерес, по-видимому, чисто теоретический».**

**Это грустное письмо было последним. Через шесть дней старый учитель физики умер. Он не мог, конечно, предвидеть все то научное значение и практические последствия, к которым привело открытие его дочери. Сожаление, высказанное им в последнем письме, было искренним и оправданным.**

**Старый учитель ошибся. Этот исторический пример хорошо подтверждает, что в науке нет ничего более практически важного, чем хорошее теоретическое исследование.**

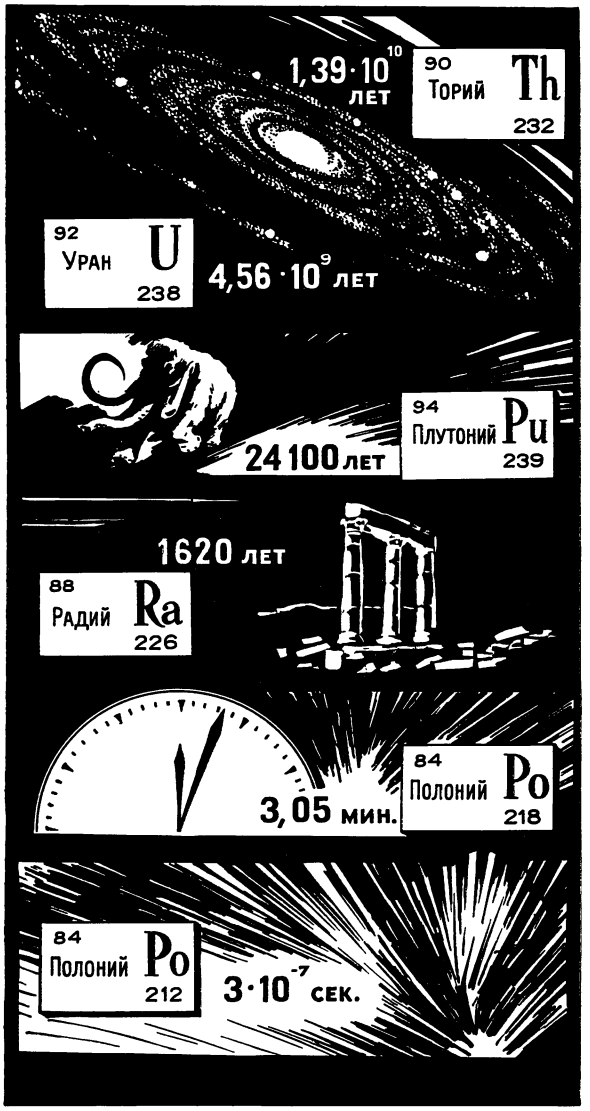



**Рис. 5. Несколько примеров различной «долговечности» изотопов.**

гадками. Ну, скажем, почему не удавалось обнаружить в природе ни одного изотопа, который входил бы в «$4n + 1$»-семейство? Куда делось это четвертое радиоактивное «древо»?

## ЭЛЕМЕНТЫ ПЕРВИЧНЫЕ И ВТОРИЧНЫЕ

Давайте немного пофантазируем. Представим себе нашу планету через... сто миллиардов лет. Конечно, никто не в силах предвидеть, что случится с Землей за этот громадный срок. Но допустим, что ничего из ряда вон выходящего не случится. Можно в таком случае уверенно сказать, какой элемент из существующих в природе будет на Земле замыкать таблицу Менделеева?

Уран? Нет! Самым тяжелым элементом периодической системы окажется висмут с порядковым номером 83. А все радиоактивные элементы бесследно исчезнут, потому что у радиоактивных элементов и всех их изотопов вполне определенная продолжительность жизни.

Чтобы охарактеризовать долговечность того или иного радиоактивного изотопа, ученые ввели понятие **«период полураспада»**. Это то время, за которое распадается половина любого количества радиоактивного изотопа. Величины периодов полураспада могут быть самыми различными.

Известны изотопы, которые теряют половину своих атомов за миллиардную долю секунды. Известно и потрясающее «долголетие», когда продолжительность жизни изотопа измеряется миллиардами миллиардов лет (рис. 5).

Сравнивая величины периодов полураспада у изотопов, входящих в радиоактивные семейства, можно сделать любопытное наблюдение: «отцы» семейств отличаются от своих «детей» поразительным долголетием. У тория-232 период полураспада равен 14 млрд. лет; у урана-238— примерно в три раза меньше. А уран-235 распадается значительно активнее — за 700 млн. лет он растрачивает половину своих атомов. По сравнению с этими громадными числами периоды полураспада у других изотопов, входящих в семейства, очень малы: секунды, минуты, дни, годы, в лучшем случае—десятки тысяч лет. Например, самый долгоживущий изотоп радия распадается наполовину всего за 1620 лет.

Наша планета существует, как считают ученые, более 6 млрд. лет. Если бы все радиоактивные элементы: полоний, астат, радон, франций, радий, актиний, протактиний — все, кроме урана и тория, были бы, так сказать, предоставлены самим себе, у них не было бы никаких шансов уцелеть за этот громадный срок. И ученые терялись бы в догадках, куда девались семь элементов конца периодической системы. Время еще пощадило торий и уран, но и их количества заметно уменьшились с момента образования земного шара.

Если мы до сих пор находим в земных минералах короткоживущие радиоактивные элементы, значит, они непрерывно образуются вновь. И источником их оказываются «отцы» радиоактивных семейств — уран и торий. Погибая сами, их атомы дают жизнь атомам других радиоактивных элементов. И этот источник иссякнет лишь,

когда исчезнут на Земле торий и уран. А произойдет это примерно через несколько десятков миллиардов лет.

Уран и торий мы называем **элементами первичными.** Они—своеобразные «генераторы» **вторичных** радиоактивных элементов (протактиния, радия, технеция, прометия и др.).

Четвертое «древо» радиоактивных превращений — («$4n+1$»-семейство) — оказалось вымершим. Ученые искусственным путем приготовили все изотопы, которые должны были входить в него. И у всех у них периоды полураспада ничтожно малы. Так малы, что изотопы погибают, едва успев родиться.

## ЧТО ТАКОЕ РАДИОАКТИВНОСТЬ?

Радиоактивность — самопроизвольный распад атомов некоторых химических элементов, расположенных в конце таблицы Менделеева. Так отвечали ученые в начале XX столетия. Но их ответ рождал новый вопрос: а почему этот самопроизвольный распад происходит? Почему атомы у одних химических элементов устойчивы, а у других нет?

Одни исследователи полагали, что радиоактивный распад вызывается излучением, проникающим на Землю из мирового пространства,— чем-то вроде открытых в то время космических лучей. Атомы тяжелых элементов обладают способностью накапливать эту энергию. Они возбуждаются, и возбуждение становится причиной их радиоактивного распада. Но эта гипотеза не подтверждалась. Эксперименты убеждали, что никакие внешние условия не влияют на радиоактивный распад — не ускоряют и не замедляют его.

В 1906 г. ученым удалось сделать сенсационное открытие. Элементы калий и рубидий, расположенные очень далеко от «неустойчивого» конца таблицы Менделеева, обнаружили слабую β-активность (рис. 6). Правда, периоды полураспада их радиоактивных изотопов равны тысячам миллиардов лет. Но важен сам факт: «тяжесть» атомов, видимо, ни при чем и радиоактивность не привилегия элементов, завершающих периодическую систему.

Тогда у ученых появилась догадка. Быть может, радиоактивность — это общее свойство всех атомов: все они в итоге обречены на взаимное превращение, на гибель. И только то, что большинство изотопов обладает огромными периодами полураспада, не дает нам заметить их радиоактивность.

Эту гипотезу пока нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть, но время работает на нее. Число природных радиоактивных изотопов тех элементов, для которых радиоактивность раньше трудно было и предположить, непрерывно растет.

Естественная радиоактивность теперь обнаружена (или предполагается) у отдельных изотопов 50 с лишним элементов, не относящихся к

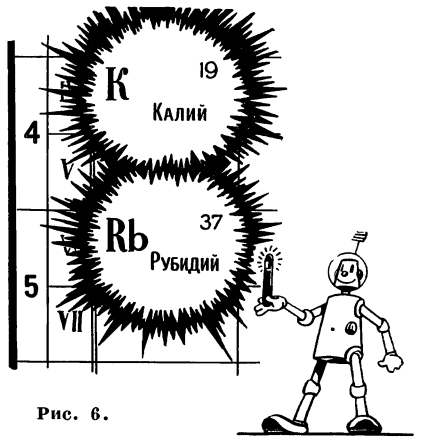



Рис. 6.

радиоактивным семействам. Правда, все они отличаются огромной долговечностью.

Другие исследователи видели причину радиоактивности в неустойчивости самих атомов, в том, что из-за каких-то загадочных причин, связанных со строением атомов, некоторые атомы оказываются неспособными к постоянному существованию. Словно что-то разрывает их изнутри. Такое объяснение ничем не могло помочь науке. Ведь ученые в то время толком не знали даже, как устроен атом. Атом считали положительно заряженной материальной сферой, в которой инкрустированы точечные электроны. Суммарный отрицательный заряд электронов нейтрализован положительным зарядом сферы. И это все, что было известно об атоме.

## «Я ВИЖУ АТОМ!»

Тех, кто бывал в лаборатории Резерфорда, всегда поражала простота ее оборудования. Никаких сложных приборов! Иные аппараты казались даже примитивными. Но с их помощью знаменитый ученый и его сотрудники отвоевывали у природы больше тайн, чем иные институты, насыщенные сложной и дорогостоящей техникой.

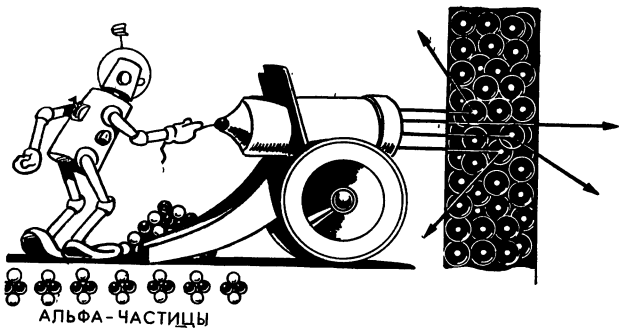



Рис. 7.

С помощью нехитрого сооружения Резерфорд доказал существование атомного ядра. Это произошло во время опытов, целью которых было определить, как рассеиваются α-частицы на металлах. Прибор отмечал поведение таких частиц, проходящих через тончайшую золотую пластинку.

Выяснилось, что частицы ведут себя по-разному. Одни проходят через пластинку, не меняя направление. Другие слегка отклоняются в сторону. А третьи почему-то отлетают обратно к источнику, словно наталкиваются на неожиданный встречный удар (рис. 7).

Резерфорд был поражен результатами эксперимента и говорил впоследствии о нем как о самом невероятном событии в его жизни: «Это было почти столь же невероятно, как если бы вы выстрелили пятнадцатидюймовым снарядом в кусок тонкой бумаги, а снаряд вернулся бы и нанес вам удар».

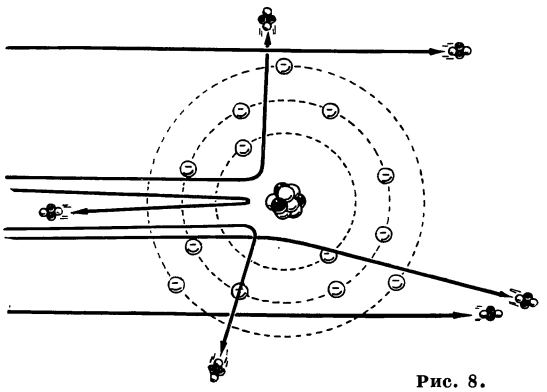


Рис. 8.

Но этот «снаряд» в клочья разнес прежние представления о строении атома. Альфа-частица могла отлететь строго назад, только столкнувшись с мощным положительным зарядом, да еще если тот был бы сконцентрирован в малом объеме (рис. 8). А по старым представлениям атом — это расплывчатая сфера больших размеров, на поверхности которой положительный заряд словно размазан тонким слоем.

Резерфорд сделал из этого опыта вывод: у атома есть ядро, в котором сгустилась почти вся масса атома, и именно в ядре сосредоточен весь положительный заряд. Диаметр ядра оказался в 100 000 раз меньше, чем диаметр атома. Атом, который раньше принимали за нечто непроницаемое, по сути дела оказался прозрачным!

Так родилась **резерфордовская модель атома.** Она представляла его строение подобным Солнечной системе: в центре ядро — Солнце, вокруг по орбитам движутся электроны — планеты. Ядро, по представлениям Резерфорда, состоит из протонов — носителей элементарного положительного заряда — и электронов. Протонов в ядре столько, сколько электронов содержится в ядре атома и на его орбитах. Например, в ядре атома гелия содержится 4 протона и 2 электрона. Заряд ядра гелия равен поэтому +2, и нейтрализуется он двумя электронами на электронной оболочке атома.

Но и эта модель не давала ответа на вопрос, в чем же причина радиоактивности.

Резерфорд мог бы сказать: «Я вижу атом!» Но чутьем гениального ученого он понимал, что атом нужно не только видеть, но и разглядеть во всех деталях. И особенно его ядро. Но у ученых не было средств, которые позволили бы им проникнуть в глубь ядра. Оно представлялось совершенно несокрушимым бастионом, и даже самые мощные осадные орудия не могли разрушить его крепкие стены.

## АЗОТ ПРЕВРАЩАЕТСЯ В КИСЛОРОД

У ядер тяжелых элементов большой заряд. В опытах Резерфорда, которые привели к созданию ядерной модели, поток α-частиц встречал на своем пути ядра золота — элемента из конца периодической системы. И электростатические силы отталкивания между положительным зарядом альфа-частиц и ядрами атомов золота были очень велики.

А если взять легкие элементы? Скажем, азот. У его ядра небольшой заряд. Силы, отталкивающие α-частицу от такого ядра, были бы значительно меньше. Быть может, альфа-частице удалось бы проникнуть в ядро?

...В самом конце первой мировой войны Резерфорд однажды не явился на заседание Британского комитета борьбы с подводными лод-

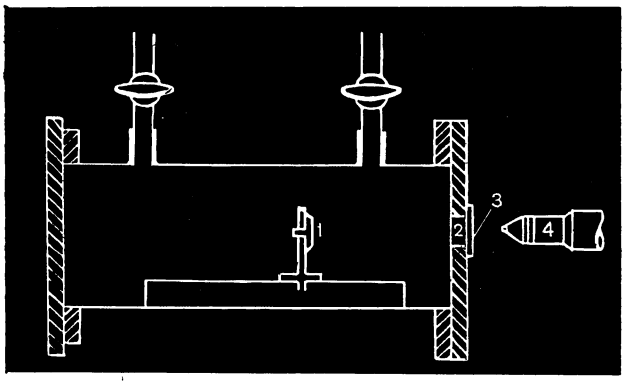



**Рис. 9. Схема прибора, в котором Резерфорд наблюдал превращение атомных ядер: *1* — диск, на который был нанесен препарат, испускающий α-частицы; прибор заполнен азотом; *2* — отверстие в стенке прибора; *3* — экран, покрытый сернистым цинком; *4* — приспособление для наблюдения вспышек на экране. Диск находился на таком расстоянии от экрана, что α-частицы не могли его достигнуть. Но Резерфорд обнаружил на экране вспышки (сцинтилляции) и сделал вывод, что их вызывают какие-то другие частицы. Ими оказались протоны, выбиваемые α-частицами из ядер азота.**

ками. Когда его упрекнули в невнимании к своим обязанностям, он в весьма резкой форме ответил: «Я был занят экспериментами, из которых следует, что атом можно искусственно разделить. А такая перспектива значительно важнее, чем война!»

Великий ученый нисколько не преувеличивал. В июне 1919 г. он опубликовал результаты своих исследований. С тех пор начался в атомной науке новый этап — эпоха искусственного превращения элементов. В природных радиоактивных процессах элементы превращались друг в друга естественным образом. Человек оставался лишь свидетелем этого удивительного явления. Резерфорд же дал человеку возможность управлять превращением элементов.

Резерфорд обстреливал азот α-частицами и в результате получил какие-то более легкие частицы (рис. 9). Он доказал, что эти частицы— ядра атомов водорода, протоны. Значит, протоны действительно входят в состав атомных ядер. Если протон покидает атомное ядро, то заряд ядра изменяется и рождается ядро нового элемента.

Массовое число у изотопа азота — 14, заряд ядра — 7. В ядро азота влетает α-частица с массой 4 и зарядом 2. Образуется сложная система: ее масса — 18, а заряд — 9. Вылетающий протон уносит одну единицу массы и одну единицу заряда. В итоге получается ядро с массой 17 и зарядом 8. Заряд ядра, равный 8, может быть только у кислорода. Следовательно, в опытах Резерфорда азот превратился в кислород (рис. 10). Это превращение можно записать символами ядерной физики:

$$_{7}N^{14} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{8}O^{17} + {}_{1}H^{1},$$

или в сокращенном виде: $_{7}N^{14}\,(\alpha, p)\,{}_{8}O^{17}$,

где $p$ — обозначение протона.

Резерфорду удалось расщепить и другие ядра — атомов бора, натрия, фтора, алюминия, фосфора и других элементов. Вот как, например, протекало превращение алюминия:

$$_{13}Al^{27} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{14}Si^{30} + {}_{1}H^{1}, \text{ или } {}_{13}Al^{27}\,(\alpha, p)\,{}_{14}Si^{30}.$$

Эта реакция вошла в историю ядерной физики как ее величайшая веха. На ее примере ученые впервые подсчитали, какая энергия выделяется при искусственном превращении элементов. И оказалось, что при превращении алюминия в кремний выделяется в 700 000 раз боль-

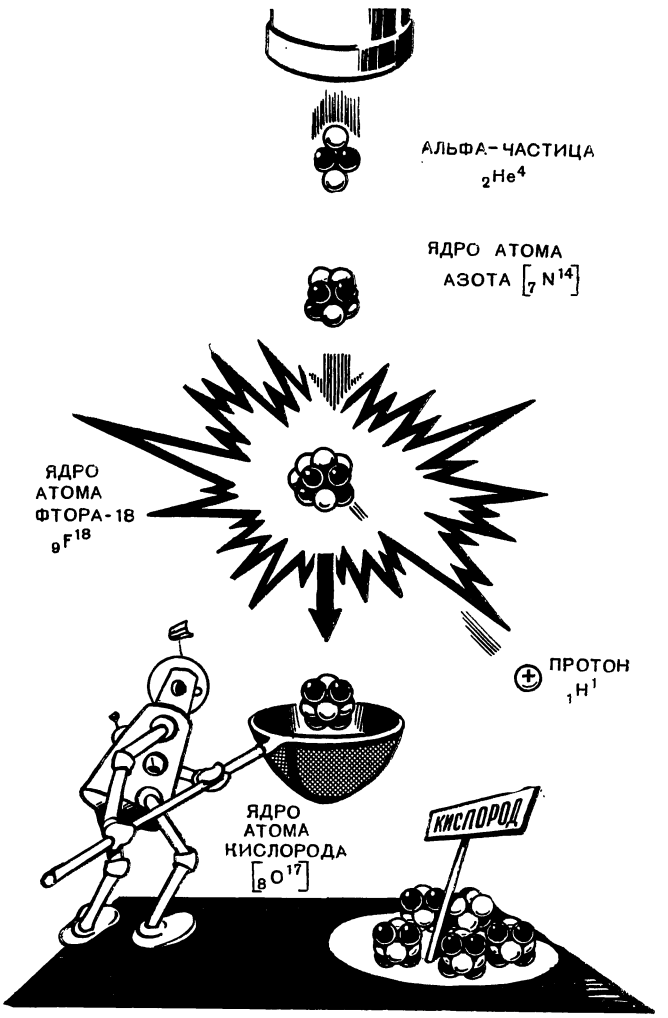



**Рис. 10.**

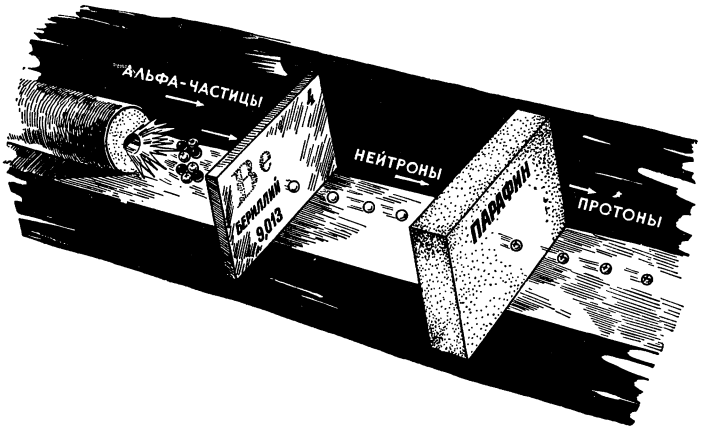



**Рис. 11. Схема образования нейтронов: α-частицы выбивают их из ядер бериллия. Если на пути нейтронов поставлен брусок из парафина, то из входящих в его состав атомов они выбивают протоны.**

ше энергии, чем при химическом сгорании такого же количества углерода.

Но α-частица могла сокрушить лишь ядра легких элементов. Для того чтобы проникнуть в ядра элементов тяжелее калия, ей не хватало быстроты. Вот если бы α-частицу удалось каким-нибудь образом ускорить или найти другой «снаряд», для которого положительный заряд ядра не был бы помехой.

## НЕЙТРОН И НОВАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

В распоряжении физиков того времени был протон — положительно заряженная частица и электрон — частица с таким же отрицательным зарядом. Ученые давно пытались установить, не существует ли частица с зарядом, равным нулю. Еще в 1902 г. английский физик Сезерленд робко предположил существование «нульчастицы». Через 18 лет Резерфорд вполне определенно предсказал нейтрон, частицу без заряда, и предугадал ее свойства. Он представлял ее себе как тесно слипшиеся между собой протон и электрон. Но в то время опыты не подтвердили идею Резерфорда. Существование нейтрона было доказано на опыте только в 1932 г.

За два года до этого события родился новый термин: «бериллиевые лучи». Они возникали, когда α-частицами бомбардировали бериллий. Бериллий при этом не превращался в другой элемент, но испускались какие-то лучи. Сначала думали, что это гамма-излучение. Но γ-лучи не могли обладать такой большой энергией и такой проникающей способностью. Значит, «бериллиевые» лучи — нечто новое.

Их природу установил ученик Резерфорда— Джемс Чэдвик. Он доказал, что «бериллиевые лучи»— это поток частиц с массой протона и не обладающих зарядом. Отсутствие заряда и было причиной их удивительной проникающей способности. Их назвали **нейтронами** (рис. 11).

В 1932 г. почти одновременно советский ученый Д. Д. Иваненко и немецкий ученый Вернер Гейзенберг предложили новую модель ядра. Электроны начисто изгонялись из его структуры. Их место заняли нейтроны. Число протонов в ядре принималось равным порядковому номеру данного элемента. Одному и тому же числу протонов могло соответствовать разное число нейтронов. Так очень просто объяснилось явление изотопии: изотопы какого-либо элемента отличались числом нейтронов в ядрах их атомов. Например, у изотопов азота с массовыми числами 14 и 15 число протонов постоянно (равно 7), а число нейтронов равно либо 7, либо 8. Но какие силы удерживают протоны и нейтроны в ядре, не дают ядру рассыпаться? Ведь в ядре между положительно заряженными протонами должны существовать гигантские силы отталкивания.

Это объяснил японский физик Хидэки Юкава. Он предположил, что протоны и нейтроны удерживаются в ядре с помощью особого «ядерного клея» — частиц, которые примерно в 200 раз тяжелее электрона (рис. 12). Позднее эти частицы назвали **мезонами**, и теперь наука знает несколько их видов (см. ст. «Элементарные частицы», стр. 268). В ядрах протоны и нейтроны с чудовищной быстротой как бы обмениваются мезонами, и благодаря этому обменному взаимодействию между составными элементами ядра оно становится способным существовать.

## ЦЕПЬ ВЕЛИКИХ ОТКРЫТИЙ

Много лет элемент уран был «замыкающим» в периодической системе. Сам Менделеев советовал будущим поколениям исследователей скрупулезно изучать уран. Еще при жизни ученого в результате исследований урана было открыто явление радиоактивности и обнаружен в природе гелий.

В конце 30-х годов нашего столетия уран снова оправдал гениальное предвидение Менделеева. И главным действующим лицом здесь оказался нейтрон. Итальянский физик Энрико Ферми в 1934 г. стал обстреливать нейтронами один элемент периодической системы за другим. Он, собственно, решил иным путем повторить

интереснейшие эксперименты супругов Ирен и Фредерика Жолио-Кюри, которые годом раньше подарили миру замечательное открытие.

Почему у химических элементов число изотопов, встречающихся в природе, все же весьма ограниченно? Скажем, кислород имеет изотопы с массовыми числами 16, 17 и 18. Но отчего нет кислорода-19 или кислорода-16? Вероятно, они просто не могут существовать. Может, потому, что попросту они неустойчивы? Ученые думали об этом, но подтвердить догадку им долго не удавалось.

Ее подтвердили своими экспериментами Фредерик и Ирен Жолио-Кюри. Они изучали, какие вещества под действием альфа-частиц способны испускать нейтроны. Такую способность им удалось наблюдать у алюминия. Но если алюминий действительно испускает нейтроны, то превращается он тогда не в кремний, как мы видели из уравнения ядерной реакции на стр. 281, а в другой элемент — фосфор:

$_{13}Al^{27} + {}_2He^4 \rightarrow {}_{15}P^{30} + {}_0n^1$, или $_{13}Al^{27}(\alpha, n)\,{}_{15}P^{30}$,

где $n$ — обозначение нейтрона.

Но изотоп фосфор-30 был новым изотопом элемента, не обнаруженным в природе. Ученые нашли, что изотоп этот радиоактивен и продукт его распада — кремний-30. Этот изотоп кремния мог образоваться только в том случае, если бы фосфор испустил какую-то частицу с массой электрона, но с положительным зарядом. Такую частицу открыл в 1932 г. американец Карл Андерсон. Она была названа **позитроном**.

Итак, был найден способ возбуждать искусственную радиоактивность, получать искусственные радиоактивные изотопы, не существующие в природе. Таких радиоактивных изотопов известно теперь более тысячи. Кроме того, супруги Жолио-Кюри обнаружили новый вид радиоактивного распада — позитронный, т. е. испускание положительного электрона, или $\beta^+$-распад (в отличие от электронного $\beta^-$-распада).

Энрико Ферми решил получить новые искусственные радиоактивные изотопы, бомбардируя различные элементы нейтронами, а не альфа-частицами, как Жолио-Кюри. Ферми немалого уже достиг, пока в его руки не попал элемент уран. Тут он вдруг обнаружил, что если нейтроны предварительно замедлить, то с их помощью ядерные реакции протекают значительно интенсивнее. И вот поток медленных нейтронов обрушился на уран, и Ферми вскоре объявил о сенсационных результатах. Под действием медленных нейтронов из урана рождались

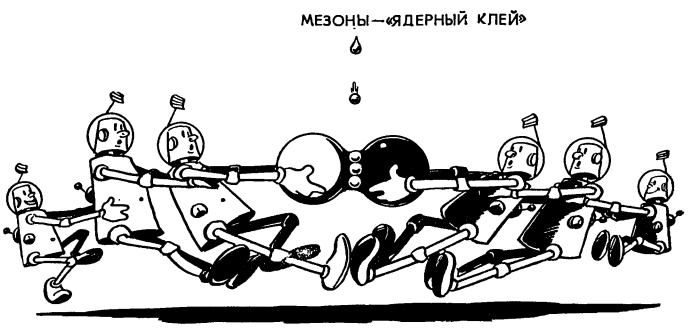



Рис. 12.

новые трансурановые элементы. Эпидемия «трансурановой лихорадки» прокатилась по лабораториям физических институтов.

Но как только химики вмешались в дело, оно приняло неожиданный оборот. На дне их пробирок оседали не микроскопические крупицы солей трансурановых элементов, а соединения элементов, появление которых представлялось совершенно загадочным. Это были соединения лантана и бария, элементов из середины периодической системы.

Тогда немецкие ученые Отто Ган и Ф. Штрассман сделали невероятное предположение: под действием медленных нейтронов ядро урана может разделиться на две части; и эти части — изотопы элементов из середины таблицы Менделеева (рис. 13). Ган тут же написал статью об открытии. Потом он вспоминал: «После того, как статья была отправлена по почте, все это показалось столь невероятным, что захотелось вернуть статью обратно из почтового ящика». Статья была опубликована 22 декабря 1938 г. Так было открыто деление урана.

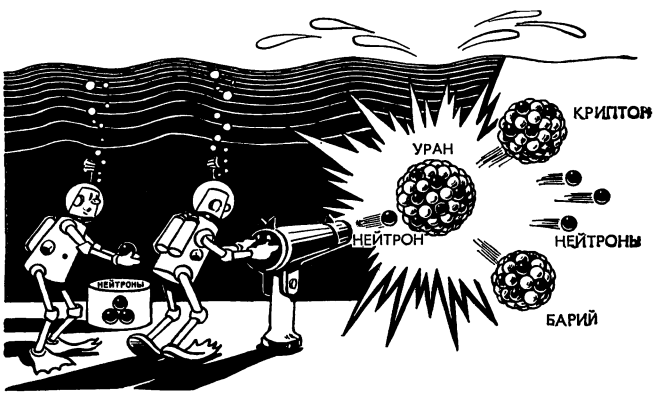



**Рис. 13. Схематическое изображение деления урана под действием медленных нейтронов. Оказалось, что нейтроны хорошо замедляются в воде.**

Ядро урана распадалось на два осколка. При этом выделялась огромная энергия. Но вместе с осколками из погибающего уранового ядра вылетало несколько свободных нейтронов. Они могли разрушать другие ядра урана. И так далее. При благоприятных условиях в куске урана могла возникнуть так называемая **цепная реакция деления** — колоссальной мощности ядерный взрыв (см. ст. «Атомный реактор»).

Человек осуществил процесс, которого, казалось, не знала природа. Люди еще не обнаружили в ней столь глубокое превращение элементов. Изотопы 35 химических элементов — от цинка (порядковый номер 30) до тербия (порядковый номер 65) — были найдены среди осколков деления урана — настоящий клад радиоактивных изотопов.

## ИСКУССТВЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В 30-х годах нашего столетия понятие «открытие элементов» сменилось другим: **«искусственный синтез элементов»**. К этому времени в периодической системе пустовали клетки с № 43, 61, 85 и 87. Неясным оставался вопрос о существовании трансурановых элементов с порядковыми номерами 93 и далее. Большинство из всех этих элементов было искусственно синтезировано раньше, чем их удалось обнаружить в земных минералах.

Ученые располагали солидным арсеналом бомбардирующих снарядов: альфа-частицей, протоном, нейтроном, дейтроном (ядром тяжелого изотопа водорода — дейтерия). Недавно к ним прибавилась и такая крупнокалиберная «артиллерия», как ядра атомов легких элементов — бора, азота, кислорода, неона. Ученые получили чудесные установки — ускорители, которые позволяли разгонять атомные «снаряды» до очень высокой скорости. Это сильно облегчало им задачу пробиться к бомбардируемым ядрам.

Первым элементом, созданным человеком, был технеций. Так назвали 43-й элемент итальянские ученые К. Перрье и Э. Сегрэ (греческое слово «технетос» — по-русски «искусственный»). Они обстреляли молибденовую пластинку дейтронами ($d$), и в результате ядерной реакции ${}_{42}Mo^{98}(d, n){}_{43}Tc^{99}$ родился в январе 1937 г. изотоп первого искусственного элемента.

В 1940 г. ученые Корсон, Мак-Кензи и Сегрэ обстреляли быстрыми $\alpha$-частицами ядра висмута. Продуктом реакции оказался изотоп другого искусственного элемента — астата (греческое слово «астатос» — по-русски «неустойчивый»); его порядковый номер 85. Потом наступила очередь прометия — 61-го элемента. С 1940 г. началась эпоха синтеза трансурановых элементов, и теперь нам известен уже изотоп лоуренсия — элемента с порядковым номером 103. А совсем недавно советские физики во главе с Г. Н. Флеровым синтезировали более 150 атомов изотопа 104-го элемента (см. ст. «На пути к открытию элемента 104»).

Замечательной «фабрикой» некоторых искусственных элементов стал ядерный реактор. В нем происходит управляемая реакция деления урана.

Среди осколков деления урана около 6% приходится на долю изотопов технеция и прометия, которые и извлекаются в довольно больших количествах. В реакторе накапливается и трансурановый элемент плутоний (Pu). Это происходит так. «Делящимся» материалом в реакторе служит изотоп уран-235. Но, помимо этого урана, в реакторе есть и изотоп с массовым числом 238. Ядра урана-238 захватывают нейтроны, и начинается цепочка радиоактивных превращений:

$$ {}_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{92}U^{239} \xrightarrow[\beta^-]{} {}_{93}Np^{239} \xrightarrow[\beta^-]{} {}_{94}Pu^{239}. $$

## ЗЕМНАЯ ЖИЗНЬ ИСКУССТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С помощью ядерных реакций было искусственно синтезировано около 60 радиоизотопов технеция, прометия, астата и франция и более 100 изотопов трансурановых элементов. Периоды их полураспада оказались ничтожно малыми по сравнению с возрастом Земли. Например, самый долговечный изотоп франция живет всего 21 минуту. А наиболее устойчивый — плутоний-244 — распадается наполовину за 76 млн. лет. Хотя все эти элементы — «вторичные», их земное существование можно считать вполне вероятным.

Изотопы астата и франция входят в радиоактивные семейства (см. вкладку у стр. 288). Но по сравнению с другими вторичными элементами они в весьма невыгодном положении. Они располагаются на боковых ответвлениях главных «магистралей» радиоактивных превращений. Эти ответвления объясняются способностью некоторых атомов распадаться двумя различными способами.

Скажем, актиний-227 в ряду урана -235 в основном способен испускать $\beta^-$-частицы, электроны. Но он может выбрасывать и $\alpha$-частицу. Такое явление называют еще «радиоактивной вилкой». На «бета-зубце» этой «вилки» находится торий-227, а на «альфа-зубце» — как раз изотоп редчайшего франция. Так же «рождается» и астат. Поэтому вторичные астат и франций образуются в очень малых количествах, а так как у них и периоды полураспада ничтожно малы, то им не удается накапливаться в ощутимых количествах. Поэтому-то астат и франций — редчайшие элементы Земли. С помощью очень сложных расчетов ученые доказали, что в слое земной коры толщиной 1,6 *км* содержится лишь несколько граммов этих элементов.

Обнаружили ученые в земных минералах и первые трансурановые элементы — нептуний и плутоний. И в довольно солидном количестве: примерно 2600 *т* плутония и 230 *т* нептуния на всю массу земной коры. «Генератором» этих вторичных элементов оказывается опять-таки уран. В природе немало свободных нейтронов. Они поглощаются ядрами урана-238, и происходит та самая цепочка радиоактивных превращений, которая протекает в атомном реакторе.

Ко вторичным элементам можно причислить и технеций с прометием. В 1940 г. советские ученые К. А. Петржак и Г. Н. Флеров открыли совершенно новый вид радиоактивных превращений. Оказалось, что ядра урана-238 могут распадаться на два осколка примерно равной величины — распадаться не под действием нейтронов, а самопроизвольно. Чтобы доказать это, Флерову и Петржаку пришлось проводить свои эксперименты на дне глубокой шахты Московского метрополитена. Многометровая толща земли не пропускала сюда нейтроны космического излучения, которые могли бы исказить результаты опытов.

Уран-238 распадается самопроизвольно с очень большим периодом полураспада (около $10^{15}$ лет). И осколки его распада получаются в таком же обширном ассортименте, как при делении урана под действием нейтронов. Среди этих осколков есть изотопы технеция и прометия. Период полураспада самого долговечного изотопа технеция равен примерно 2 миллионам лет, а прометия — всего 18 годам.

Земные ресурсы вторичных технеция и прометия совершенно ничтожны. И тем не менее в 1961 г. американские ученые Кенна и Курода обнаружили в урановых минералах чуть приметные следы технеция.

Очередь теперь за прометием. Возможно, что и исчезающие малые количества более тяжелых земных трансуранов, чем плутоний, когда-нибудь попадут в руки ученых. И помогут в этом сложнейшие и чувствительнейшие радиометрические приборы.

## КАК ОБЪЯСНЯЕТСЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ СОВРЕМЕННОЙ НАУКОЙ?

Существует наука с довольно скучным названием: «изотопная статистика». Она наводит строгий бухгалтерский учет для тысячи с лишним радиоактивных изотопов.

Вспомним, какие виды радиоактивных превращений нам известны. Это — альфа-распад, бета-распад и спонтанное (самопроизвольное) деление. Обратим особое внимание на бета-распад. Изотопная статистика подсчитала, что около 80% всех радиоактивных изотопов распадается по типу бета-распада.

**Бета-распад** объединяет три самостоятельных вида радиоактивных превращений. Первый вид — испускание электрона ($\beta^-$-распад). Второй вид — испускание позитрона ($\beta^+$-распад). Третий вид обнаружил в 1937 г. американский ученый Луис Альварец. Оказалось, что некоторые ядра могут поглощать электроны с ближайших к ядру электронных оболочек. Заряд ядра-поглотителя, как и при $\beta^+$-распаде, уменьшается на единицу. Природная радиоактивность калия-40 как раз связана с тем, что ядром этого изотопа поглощается орбитальный электрон (см. рисунки 5 и 10 в ст. «Великий закон»). Если электрон поглощается ядром с *K*-оболочки (ближайшей к ядру), то это так называемый *K*-захват; если со следующей *L*-оболочки — это *L*-захват, но он встречается крайне редко. Значит, в процессах бета-распада обязательно участвует либо электрон, либо его электрический антипод — позитрон.

Ядра состоят только из протонов и нейтронов. И тем не менее при $\beta^-$- или при $\beta^+$-распадах из ядер вылетают электроны и позитроны. Модель ядра не приемлет электроны, и между тем электрон поглощается ядром при **орбитальном захвате.** Как же это понять?

А если допустить, что ядерные протоны и нейтроны не неизменны и способны превращаться друг в друга? Ядерный нейтрон может превращаться в протон, при этом вылетает электрон и заряд ядра увеличивается на единицу. Тут происходит $\beta^-$-распад. Ядерный протон в свою

очередь может стать нейтроном, а положительный заряд уносится вместе с позитроном. Заряд ядра станет на единицу меньше. Здесь мы имеем дело с $\beta^+$-распадом. Заметим, что одновременно с позитроном или электроном вылетает элементарная частица нейтрино $\nu$ (или антинейтрино $\tilde{\nu}$).

Мы можем записать эти виды распадов в в виде схем:

$$n \to p + e^- + \tilde{\nu} \quad \text{и} \quad p \to n + e^+ + \nu.$$

А процесс орбитального захвата можем изобразить так:

$$p + e^- \to n + \nu.$$

Выходит, что при $\beta^-$-распаде ядро, теряя нейтрон, приобретает лишний протон, а при $\beta^+$-распаде и орбитальном захвате оно, наоборот, меняет протон на нейтрон. Механика, на первый взгляд, очень несложная.

Но почему тогда далеко не все ядра подчиняются этой механике?

Важнейшее условие устойчивости атомных ядер — отношение числа содержащихся в них нейтронов к числу протонов ($n:p$). Это соотношение меняется с ростом заряда в ядре. Оно приблизительно равно 1 у изотопов легких элементов и достигает 1,6 у тяжелых. Только при определенных величинах отношения $n:p$ ядра устойчивы. При других же отношениях они способны к бета-распаду.

Неустойчивы ядра с большим числом нейтронов — у них велико отношение $n:p$. Как оно может уменьшиться? Только если $n$ станет меньше, а $p$ — больше, если нейтрон превратится в протон, испустив электрон, т. е. путем $\beta^-$-распада. Поэтому все тяжелые изотопы с избытком нейтронов оказываются $\beta^-$-активными.

Когда же отношение $n:p$ мало, то у ядра появляется стремление заменить протон на нейтрон и, испустив позитрон, восстановить равновесие. Легкие радиоактивные изотопы химических элементов надо считать приверженцами $\beta^+$-распада.

Орбитальный захват — это тоже привилегия легких изотопов, стремящихся к обмену протона на нейтрон. Но встречается он главным образом у элементов, у которых внутренние электронные оболочки расположены близко к ядру, т. е. у элементов в середине и в конце периодической системы.

Почему же ядра остаются устойчивыми при каких-то «избранных» отношениях $n:p$? Может быть, эта устойчивость мнимая и ядра даже при этих соотношениях в очень слабой (необнаружимой пока) степени радиоактивны? Или же вся эта схема лишь весьма грубое приближение к действительности — своего рода «рабочая модель»?

Словом, на вопрос: «Что такое радиоактивность?» — в наше время еще нет исчерпывающего ответа. Быть может, кому-нибудь из вас придется принять участие в его решении.

Обратимся теперь к другим видам радиоактивного распада. **Альфа-распад** — явление частое среди радиоактивных изотопов. И главным образом у элементов конца периодической системы. Вылет $\alpha$-частицы сопровождается изменением массы исходного ядра на 4, а заряда — на 2 единицы. Поэтому долгое время считалось, что к альфа-распаду способны только самые тяжелые, наиболее сложные ядра — ядра элементов начиная со свинца и висмута.

Каково же было удивление ученых, когда они установили, что альфа-распад может быть у многих изотопов редкоземельных элементов, расположенных в середине таблицы Менделеева. Отдельные изотопы лантана и церия, празеодима и неодима, самария и гадолиния, диспрозия и тербия по странной прихоти природы охотно теряют альфа-частицы.

Оправдать эту прихоть помогла так называемая **оболочечная модель атомного ядра.** Протоны и нейтроны слипаются в ядерный комок не в беспорядке, заявили ученые. Напротив, составные частицы ядра должны располагаться в строгом порядке. Подобно тому как электроны в атомах распределяются по оболочкам, ядерные протоны и нейтроны также разложены по «полочкам» с разными уровнями энергии и на эти «полочки» вмещаются строго определенные количества протонов или нейтронов — 2, 8, 20, 50, 82, 126. Ядра, содержащие такие количества частиц, получили название «магических», их можно считать своеобразными «инертными газами» в периодической системе изотопов (подробнее об этом см. в ст. «Великий закон»).

Ядра изотопов редкоземельных элементов содержат количества нейтронов, близкие к «магическому» числу 82. И эта близость, как доказали физики, способствует нарастанию вероятности $\alpha$-распада. Поэтому в области редкоземельных элементов наблюдается первая на протяжении периодической системы «вспышка» $\alpha$-активности. В районе классических $\alpha$-излучателей (элементы конца таблицы Менделеева) дает себя знать близость оболочки из 126 нейтронов.

В целом 16% радиоактивных изотопов распадаются, испуская $\alpha$-частицы.

**Спонтанное** (самопроизвольное) **деление** — это самый кардинальный тип радиоактивных превращений. Он встречается только у очень тяжелых ядер. Ему подвержены многие α-активные ядра, а в особенности у изотопов трансурановых элементов. У ядер, находящихся в соседстве с ураном, спонтанное деление — явление очень редкое. Если бы в природе существовало только спонтанное деление, то, например, из 1 *г* изотопа тория-232 осталось бы 0,5 *г* за колоссальный срок, который даже трудно себе представить, — $10^{21}$ лет. Этот изотоп превращается гораздо быстрее благодаря α-распаду.

С ростом заряда в ядре вероятность самопроизвольного деления стремительно нарастает, и, например, у изотопа менделевий-256 (порядковый номер 101) период полураспада при спонтанном делении равен всего 30 минутам. Физики установили четкий критерий способности ядра к самопроизвольному делению. Он измеряется отношением квадрата заряда ядра $Z$ к атомному весу $A$ (массовому числу) изотопа. Как только величина $Z^2:A$ достигает значения 44,5, самопроизвольное деление становится вероятным.

Оболочечная модель ядра не может объяснить, как происходит механизм спонтанного деления. Приходится привлекать для этого другую модель — **капельную.** Ученые давно проводили аналогию между свойствами ядра и свойствами капли жидкости. Если капле сообщить достаточную энергию, привести ее в движение, то она может разделиться на более мелкие капли. Подобным же образом и ядро, если оно, как говорят физики, придет в возбужденное состояние, способно делиться — либо под действием нейтронов, либо самопроизвольно.

## УПРАВЛЯЕМЫЙ РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД

То, о чем сейчас пойдет речь, быть может, вам покажется весьма фантастическим. Возможен ли управляемый радиоактивный распад? Ученые воздерживаются пока от каких-либо конкретных гипотез в этой области.

Но здесь нелишне вспомнить любопытный исторический парадокс. Всего за несколько лет до того, как был пущен первый ядерный реактор, такие великие умы человечества, как Эйнштейн и Резерфорд, скептически относились к возможности практического применения ядерной энергии.

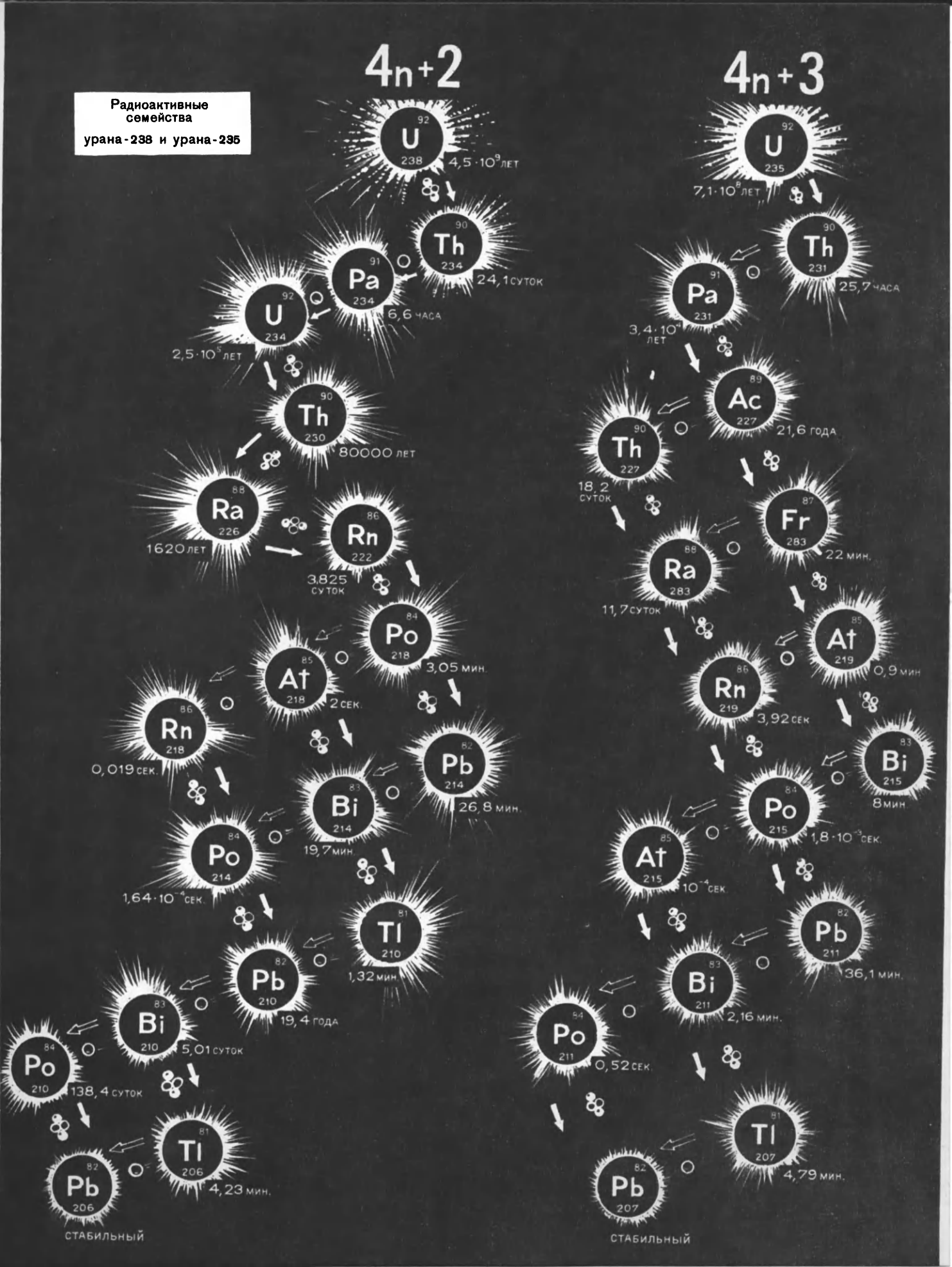
Бесчисленные эксперименты убеждали: человек не властен по своему усмотрению изменить ритм атомных «часов», он не может ни замедлить, ни ускорить радиоактивный распад. Ученые подвергли радиоактивные вещества действию солнечного жара и космического холода, сильнейших электрических и магнитных полей, использовали глубокий вакуум и давление в сотни тысяч атмосфер — периоды полураспада радиоактивных изотопов не изменялись.

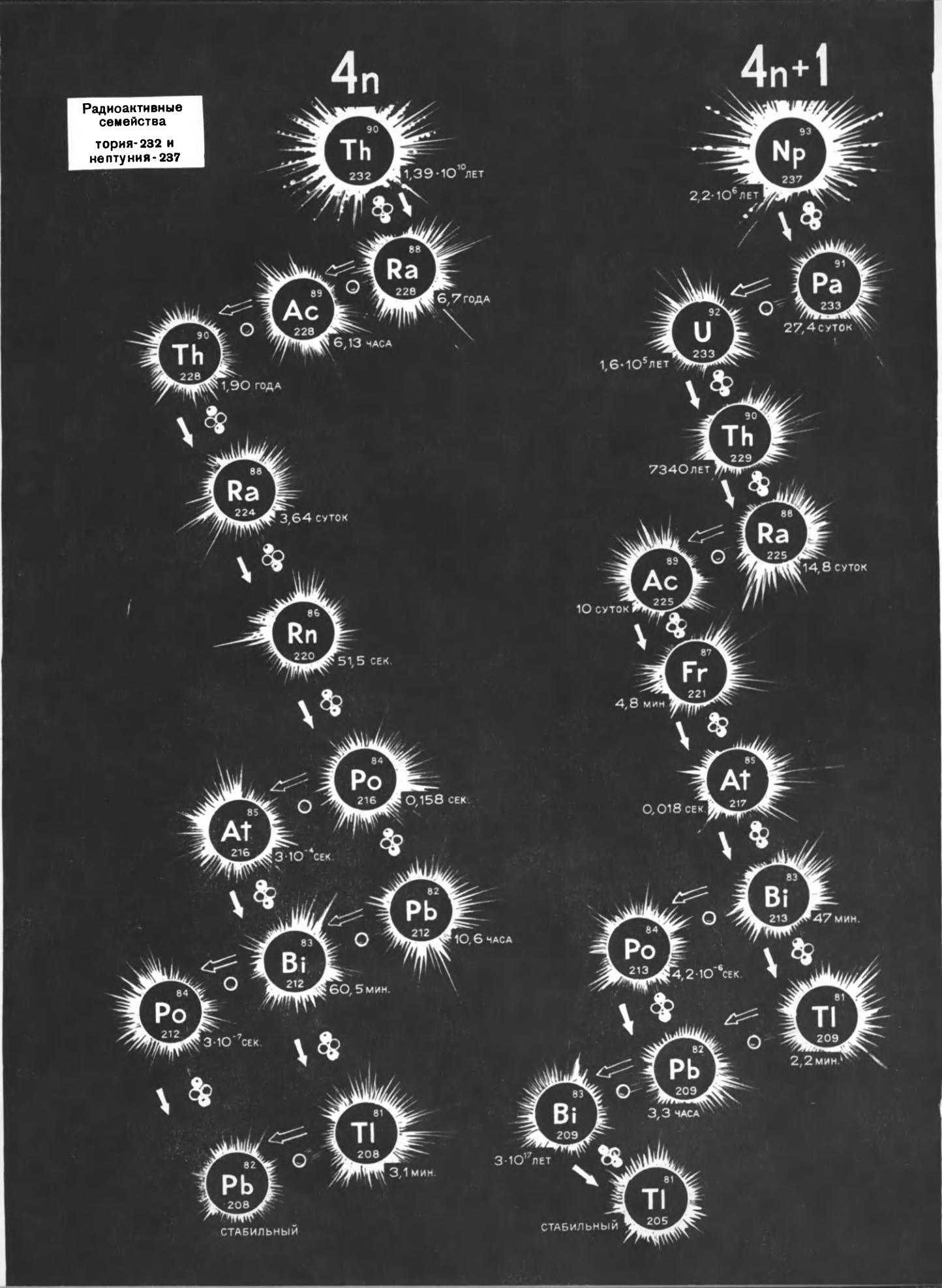
Но есть среди процессов радиоактивных превращений уже знакомый нам орбитальный захват. В этом процессе участвуют электроны с внутренних оболочек. У изотопов какого-нибудь очень легкого элемента мало электронных оболочек, и все они фактически внешние. Напомним, что химические свойства элементов как раз зависят от числа электронов и их расположения на внешних оболочках атомов. У элементов второго периода таблицы Менделеева валентные электроны, участвующие в химических связях, находятся во второй, т. е. в $L$-оболочке. В теории валентности существует понятие плотности валентных электронов. Они могут быть расположены, грубо говоря, гуще либо реже. Это зависит от того, входит данный элемент в состав какого-нибудь соединения или же он находится в свободном состоянии.

При орбитальном захвате ядро может поглощать электрон с $L$-оболочки. Чем ближе к ядру расположена эта оболочка, чем гуще на ней скопление электронов, тем более вероятен $L$-захват. А ведь только что мы видели: у легких элементов электроны $L$-оболочки валентные. Следовательно, если найти такой элемент, у которого, во-первых, существует $L$-захватный изотоп, а, во-вторых, электроны $L$-оболочки валентные, то не повлияет ли на период полураспада форма химического соединения, в которое этот элемент входит?

Есть такой изотоп: бериллий-7. Именно с ним поставили свои эксперименты ученые Сегрэ и Буше. И пришли к поразительному выводу: когда бериллий входил в состав соединения $BeF_2$, то скорость $L$-захвата в бериллии-7 хоть и на малую величину, но ощутимо замедлялась по сравнению с таким же процессом в чистом металлическом бериллии. В соединении густота электронов $L$-оболочки оказалась меньше.

Влиять на скорость α-распада, спонтанного деления, испускания электронов и позитронов еще невозможно: ученые не видят для этого конкретные пути. А ведь какие грандиозные перспективы откроет перед человечеством


Радиоактивные семейства урана-238 и урана-235
4n+2
4n+3
U 92 238 4,5·10⁹ лет
Th 90 234 24,1 суток
Pa 91 234 6,6 часа
U 92 234 2,5·10⁵ лет
Th 90 230 80000 лет
Ra 88 226 1620 лет
Rn 86 222 3,825 суток
Po 84 218 3,05 мин.
At 85 218 2 сек.
Rn 86 218 0,019 сек.
Pb 82 214 26,8 мин.
Bi 83 214 19,7 мин.
Po 84 214 1,64·10⁻⁴ сек.
Tl 81 210 1,32 мин.
Pb 82 210 19,4 года
Bi 83 210 5,01 суток
Po 84 210 138,4 суток
Tl 81 206 4,23 мин.
Pb 82 206 стабильный
U 92 235 7,1·10⁸ лет
Th 90 231 25,7 часа
Pa 91 231 3,4·10⁴ лет
Ac 89 227 21,6 года
Th 90 227 18,2 суток
Fr 87 283 22 мин.
Ra 88 283 11,7 суток
At 85 219 0,9 мин
Rn 86 219 3,92 сек
Bi 83 215 8 мин
Po 84 215 1,8·10⁻³ сек.
At 85 215 10⁻⁴ сек.
Pb 82 211 36,1 мин.
Bi 83 211 2,16 мин.
Po 84 211 0,52 сек.
Tl 81 207 4,79 мин.
Pb 82 207 стабильный


Радиоактивные семейства
тория-232 и нептуния-237
4n
4n+1
Th 90 232 1,39·10^10 лет
Ra 88 228 6,7 года
Ac 89 228 6,13 часа
Th 90 228 1,90 года
Ra 88 224 3,64 суток
Rn 86 220 51,5 сек.
Po 84 216 0,158 сек.
At 85 216 3·10^-4 сек.
Pb 82 212 10,6 часа
Bi 83 212 60,5 мин.
Po 84 212 3·10^-7 сек.
Tl 81 208 3,1 мин.
Pb 82 208 стабильный
Np 93 237 2,2·10^6 лет
Pa 91 233 27,4 суток
U 92 233 1,6·10^5 лет
Th 90 229 7340 лет
Ra 88 225 14,8 суток
Ac 89 225 10 суток
Fr 87 221 4,8 мин.
At 85 217 0,018 сек.
Bi 83 213 47 мин.
Po 84 213 4,2·10^-6 сек.
Tl 81 209 2,2 мин.
Pb 82 209 3,3 часа
Bi 83 209 3·10^17 лет
Tl 81 205 стабильный

возможность регулировать процессы радиоактивного распада!

Если бы ученые научились увеличивать скорость распада долгоживущих радиоактивных изотопов, то тем самым они безгранично расширили бы ассортимент ядерного горючего. Едва ли не каждый элемент периодической системы сможет стать тогда источником ядерной энергии.

Если бы мы, наоборот, сумели замедлить скорость радиоактивного превращения короткоживущих изотопов, как бы «заморозили» периоды их полураспада, тогда возможность синтеза сверхтяжелых трансурановых элементов стала бы гораздо шире. Пока что предел их искусственного получения уже близок. Вряд ли ученым удастся изготовить образцы с порядковыми номерами больше 110: изотопы этих элементов будут погибать, едва успев образоваться,— такую сильную радиоактивность предсказывает для них теория. Если ученые научатся «замораживать» периоды полураспада, периодическая система пополнится многими новыми элементами, да еще в количествах, которые будет легко взвесить на обычных лабораторных весах.

Что же мешает? Да то, что мы неясно представляем себе механизм ядерных сил. И устройство самого ядра для нас еще во многом загадочно.

## СКОЛЬКО ВИДОВ РАДИОАКТИВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ СУЩЕСТВУЕТ?

История исследований радиоактивности протекала примерно так же, как и история любой другой науки: ученые сначала открывали те процессы и явления, которые, так сказать, лежали на поверхности. Не мудрено поэтому, что испускание ядер гелия и электронов удалось обнаружить уже вскоре после работ Беккереля. Зато открытие позитронного распада, орбитального захвата, самопроизвольного деления потребовало уже специальных знаний и сложных приборов.

Удастся ли нам еще пополнить перечень видов радиоактивных превращений?

Теоретики уже давно предсказывали новый вид радиоактивности — так называемую **протонную радиоактивность**. Те изотопы, полагали ученые, у которых в ядрах очень мáло нейтронов (малó отношение $n:p$), могут самопроизвольно испускать протон. Наши экспериментаторы во главе с Г. Н. Флеровым доказали это на опыте. Теоретики полагают, что возможна и двухпротонная радиоактивность.

Теория предсказывает также, что должно пополниться «семейство» бета-распадов. Его предполагаемый член именуется в науке **двойным $\beta^-$-распадом**. Некоторые ядра смогут испускать одновременно два электрона, а два нейтрона — превращаться в протоны. Можно насчитать немало ядер, у которых предполагается $2\beta^-$-радиоактивность. Периоды их полураспада должны быть огромными.

А дальше?

Нисколько не фантастично предположить, что еще наше поколение пополнит перечень видов радиоактивных превращений.

Вот, если хотите, тема для размышлений. Маленькая аналогия из области истории науки. Прежде чем было открыто самопроизвольное деление урана, ученые узнали об искусственном делении его ядер под действием медленных нейтронов. Механизм обоих процессов одинаков, состав осколков один и тот же.

Сейчас в ядерной физике широко известен процесс расщепления тяжелых ядер под действием быстрых частиц, например протонов. Они откалывают от ядер «куски», «фрагменты» самой различной величины. В процессе расщепления получаются изотопы почти всех химических элементов таблицы Менделеева.

А может быть, подобное радиоактивное превращение протекает и естественным образом? Может, ядра элементов конца периодической системы самопроизвольно испускают «фрагменты», более крупные, чем альфа-частицы? Например, легкие ядра лития, бериллия, углерода, азота? Любопытно, что эта идея **«фрагментарной» радиоактивности** не так уж нова: еще в 1926 г. один английский ученый доказывал, что уран обладает своеобразной «азотной» радиоактивностью, т. е. его ядра способны выбрасывать ядра азота.

Несомненно одно: атомы куда более изобретательны в выборе вида радиоактивности, чем представляем мы себе сейчас. Но когда ученые пытаются в этой изобретательности разобраться поглубже, они упираются в слабое знание «внутренней жизни» атомных ядер.

## ГАММА-ЛУЧИ

Мария и Пьер Кюри разделили лучи, открытые Беккерелем, на три пучка: альфа-частицы, бета-частицы и гамма-лучи. До сих пор мы говорили только о первых двух пучках. Гамма-лучи

также играют большую роль во многих видах радиоактивного распада. У этих лучей много общего с лучами Рентгена. И те и другие представляют собой электромагнитные излучения. Только длина волны у гамма-лучей значительно короче. В природе вообще нет волн более коротких, чем гамма-лучи.

Рентгеновские лучи возникают в атоме в результате перехода электронов с одной оболочки на другую, более глубокую. Энергия, выделяющаяся в этом процессе, проявляется внешне в виде рентгеновского излучения. У гамма-лучей уже не электронная, а ядерная природа. Атомное ядро, приобретя некоторый избыток энергии, приходит в возбужденное состояние. Оно стремится избавиться от излишней энергии и перейти в обычное (невозбужденное) состояние. Когда же такой переход происходит, выделяется гамма-квант, рождаются гамма-лучи. Квант — это определенное, наименьшее из возможных, количество энергии.

Ядро, образовавшееся в результате альфа- или бета-превращения, обычно приходит в состояние возбуждения. Поэтому альфа- и бета-распады часто сопровождаются гамма-излучением. При гамма-излучении превращение элементов не происходит.

Гамма-квант может, еще не вылетев за пределы атома, передать свою энергию одному из электронов (такое явление в науке называется **внутренней конверсией**). Электрон, поглотивший гамма-квант, вылетает из атома, а на его место переходит электрон с другой оболочки. При переходе электронов с оболочки на оболочку появляются лучи Рентгена.

Мы уже говорили о ядрах-родственниках — об изотопах. У изотопов какого-либо элемента одинаковое количество протонов и различное количество нейтронов. Исследование гамма-лучей позволило ученым обнаружить в мире атомов и другие родственные группы: изобары и изомеры (рис. 14).

**Изобары** («изобары» по-гречески — «равнотяжелые») принадлежат разным элементам, но имеют одинаковые массовые числа, одну и ту же сумму протонов и нейтронов, хотя количества протонов у них различны. Например, изотопы бериллий-10 и бор-10 — изобары.

**Изомеры** на первый взгляд ничем не различаются, у них равны не только суммы, но и в отдельности числа протонов и нейтронов. Но способность к радиоактивности у них различна. Ядро у одного изомера распадается быстрее, чем у другого. Это объясняется тем, что их ядра находятся в различных энергетических

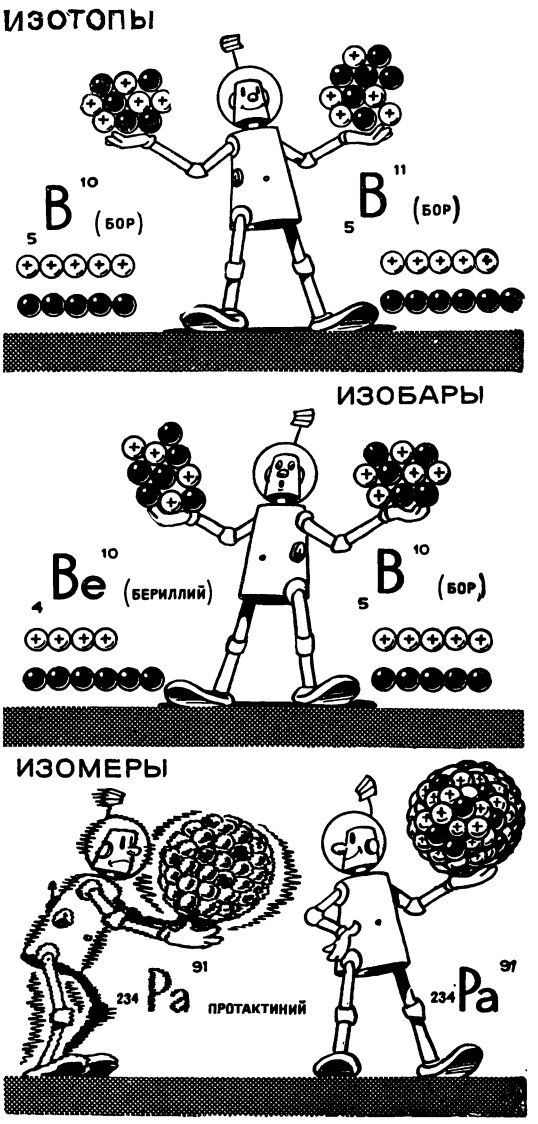



**Рис. 14. Примеры изотопов (число протонов одинаково, число нейтронов различно), изобаров (числа протонов и нейтронов различны, одинаковы их суммы) и изомеров (числа протонов и нейтронов одинаковы, различны энергии ядер).**

состояниях: одно возбуждено, другое — нет. Так, например, у протактиния-234 два изомера. Возбужденное ядро одного из них распадается с периодом полураспада 1,18 минуты, а невозбужденное ядро другого распадается наполовину за 6,7 часа. Возбужденное ядро переходит в невозбужденное состояние, испуская гамма-лучи. Сейчас ученым известно более 200 изомерных пар.

## КОРОТКО О НУКЛОНАХ

Какие бы удобства ни представляла протонно-нейтронная модель ядра, она все-таки лишь схема, которая более или менее удачно объясняет факты, накопленные ядерной физикой.

Физики, в конце концов, пришли к весьма неожиданному выводу. «Чистых» протонов и нейтронов в ядре нет. Есть некое ядерное вещество. Отдельные «кусочки» этого ядерного вещества — **нуклоны** — могут существовать в двух состояниях: иметь положительный заряд или вообще не иметь заряда. Эти два состояния могут превращаться друг в друга. Внешне такое превращение выглядит как превращение нейтрона в протон или наоборот. И объяснять природу ядерных сил теперь пытаются, рассматривая обмен мезонами между двумя нуклонами.

В последние годы ученые решили выяснить, как устроен нуклон. Для этого потребовались весьма тонкие и сложные эксперименты, весь арсенал знаний, накопленных ядерной физикой. Им удалось определить размер нуклона, его радиус. Радиус ядра был известен физикам уже давно. Он равен в среднем $1{,}35 \cdot 10^{-13}$ *см* (для сравнения укажем, что радиус простейшего атома — атома водорода — $10^{-8}$ *см*). Плотность ядерного вещества чудовищно велика — около $2 \cdot 10^{14}$ *г/см*$^3$, т. е. примерно 200 млн. *т* в одном кубическом сантиметре. Если бы из вещества подобной плотности удалось изготовить шар радиусом в 200 *м*, он весил бы столько, сколько планета Земля.

Ученые представляют себе строение нуклона так. В центре его находится своеобразное ядрышко — «керн». Его радиус примерно равен $0{,}3 \cdot 10^{-13}$ *см*. Керн окружен «облаком», состоящим из мезонов. Что представляет собой керн, пока еще неизвестно. Мы знаем о нем еще меньше, чем о строении ядра Земли.

Нуклоны, находящиеся в положительно заряженном состоянии (протоны), и нуклоны, не имеющие заряда (нейтроны), ведут себя по-разному. Нуклоны остаются для ядерной физики «загадкой № 1», а точная расшифровка их строения помогла бы ответить на множество важнейших вопросов. В том числе и на такой: что же такое радиоактивность?

## МАЛЕНЬКАЯ ИНТЕРМЕДИЯ

В 1896 г. Анри Беккерель открыл радиоактивность. Пятьдесят лет спустя над пустыней Лос-Аламос вырос ядовитый атомный «гриб». Еще через 10 лет со стапелей ленинградской судоверфи сошел первый в мире атомный ледокол «Ленин». За короткий срок атом, который считался неизменным, стал и атомом-разрушителем и атомом-созидателем.

На первых порах природа зашифровала новое для науки явление — радиоактивность. Неизмерим труд сотен ученых, которые в разных странах переводили таинственные знаки природы на конкретный язык науки. И сейчас радиоактивность представляется нам огромной и интересной книгой. В ней еще не понятны многие строки и даже целые страницы. Эту книгу предстоит еще дописывать и дописывать грядущим поколениям ученых.

Трудно переоценить значение радиоактивности для судьбы Земли. Радиоактивность «повинна» в том, что наша планета, которая сначала была холодным шаром, постепенно разогревалась. Ее согревало тепло радиоактивного распада урана, тория и неустойчивого изотопа калия.

Земные элементы живут. Они гибнут и рождаются. Одни элементы превращаются в другие. Радиоактивный распад приводит к тому, что в земном шаре изменяется содержание изотопов различных элементов. Происходит медленное исчезновение менее устойчивых и накопление более устойчивых изотопов.

А тут еще, кроме внутренних ядерных сил, в жизненные процессы элементов вмешиваются силы внешние: бесчисленное множество ядерных реакций, протекающих в земной коре; частицы, входящие в состав космического излучения; свободные нейтроны. Такие внешние силы дополнительно вызывают превращение химических элементов на Земле.

Но известны далеко не все эти внешние силы: наука только-только начала изучать подобные ядерные реакции, происходящие в природе. Мы стоим сейчас на пороге той, пока загадочной области знаний, которую следовало бы назвать эволюцией химических элементов на Земле.

Радиоактивность — не частная привилегия земных элементов. Куда необъятнее темы «Вселенная и радиоактивность», «Вселенная и ядерные реакции». Космос — это подмостки гигантской сцены, на которой разыгрываются целые трагедии в мире химических элементов. И разыгрываются в масштабах, которые трудно себе представить.

Пример такой трагедии — происхождение химических элементов. Во Вселенной идет вечный процесс образования элементов, всех эле-

ментов, которые на Земле расположились на клетках великой карты — периодической системы Менделеева.

## ПОЧЕМУ СВЕТЯТ ЗВЕЗДЫ?

Ученые давно искали ответ на этот вопрос. Химики говорили: в недрах звезд происходят гигантские химические процессы горения. Физики подсчитывали, размышляли, делали вывод: «Заблуждение! Химические реакции не могут выделять такое громадное количество тепла. Звезды светят миллиарды лет, а запасов химического топлива хватило бы очень ненадолго».

Исследователи радиоактивности придерживались иных взглядов: «Звезды — это гигантские кладовые радиоактивных элементов,— говорили они. — Даже таких тяжелых, которые неизвестны на Земле. Тепло их распада и питает вечный звездный огонь». Теоретики исписывали горы бумаги и разводили руками: в тепловом балансе звездного хозяйства концы не сходились с концами. Радиоактивный распад при всем его могуществе не мог быть источником светимости звезд.

Шведский ученый Сванте Аррениус первым назвал совершенно неожиданный источник энергии звезд. Он предположил, что существует природный процесс, при котором легкие атомы, например водород, могут соединяться в более тяжелые: «Гелий представляет собой важный элемент на пути от водорода к более тяжелым элементам».

Если перевести слова Аррениуса на язык современной науки, то они будут звучать так: основа энергетического богатства звезд — превращение ядер водорода в ядра гелия. А если в звездах происходит процесс постепенного усложнения атомных ядер, то это— основная идея, на которой можно строить предположения о путях происхождения всех химических элементов.

В 1928 г. физики-теоретики австриец Хоутерманс и американец Аткинсон превратили гипотезу Аррениуса в научную теорию. Они показали, по каким последовательным ступенькам происходит превращение водорода в гелий, и подсчитали, что этот простейший синтез ядер может очень долгое время разогревать небесное светило. Ведь при превращении 1 *г* водорода в гелий выделяется 1250 млрд. *дж* (300 млрд. калорий) тепла (рис. 15). Этого превращения вполне достаточно, чтобы, скажем, Солнце

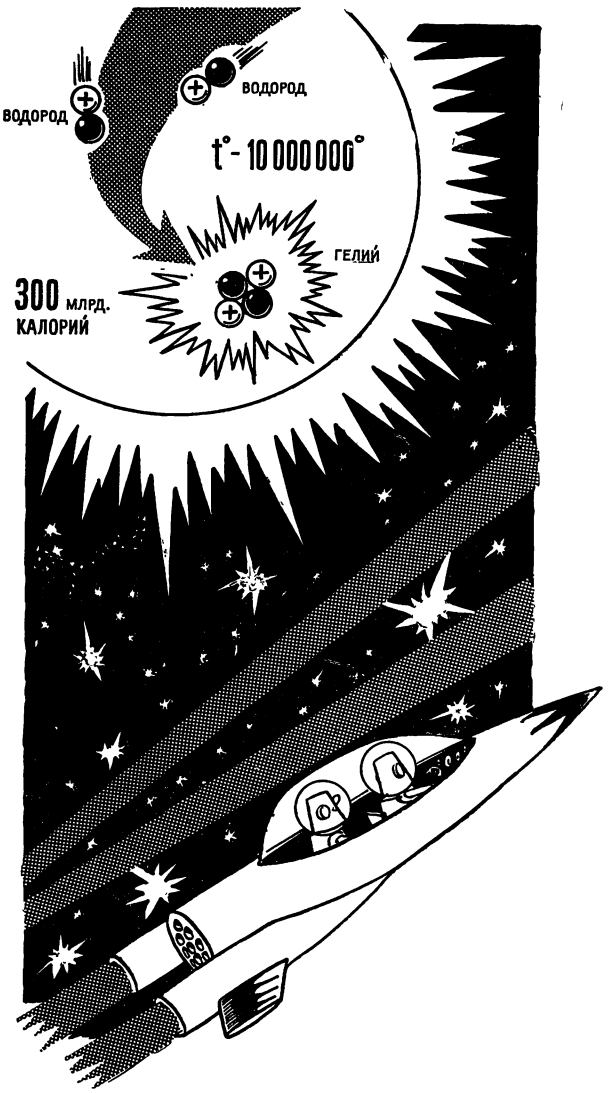



**Рис. 15. Превращение ядер водорода в ядра гелия сопровождается выделением огромного количества энергии.**

могло щедро одаривать Землю своими лучами многие миллиарды лет. Подавляющее большинство известных нам звезд фактически состоит из водорода и гелия. Прочие элементы на них — лишь небольшая примесь. Если на Земле преобладают кислород и кремний, то в космосе наиболее распространены именно водород и гелий— самые первые, самые легкие элементы периодической системы.

Но гелий может рождаться из водорода только при очень высоких температурах. Самые легкие ядра вступают в термоядерные реакции,

если в звездных недрах господствует жар в 10 млн. градусов. Чтобы гелий мог превращаться в более тяжелые элементы, такой температуры уже недостаточно.

Астрофизик Ганс Бете в 1938 г. подсчитал: тот максимум температуры, на который «способны» недра обычных звезд, не превышает 20 млн. градусов. Но при такой температуре ядерный синтез не пойдет дальше образования гелия.

Одно из двух: или звезды — неподходящие «фабрики» химических элементов и те каким-то неведомым способом образовались, когда и самих-то звезд еще не существовало, или следует искать особые, сверхгорячие звезды, раскаленные до миллиардов градусов.

## «ВЕСЬ МИР ЗА ПЯТНАДЦАТЬ МИНУТ»

Ученые стали развивать теории дозвездного образования элементов. Воображение рисовало им потрясающие температуры в сотни миллиардов градусов, огромные давления, вещество, сжатое до предела, такое тяжелое, что маленькая его крупинка весила бы больше Земли. В подобных условиях и могли синтезироваться все элементы.

...Если бы в науке было принято рекламировать ту или иную теорию, то суть так называемой альфа-бета-гамма-теории можно было бы выразить фразой: «Весь мир за пятнадцать минут». Ее авторы—ученые Х. Альфвен, Г. Бете и Г. Гамов. Теорию назвали начальными буквами греческого алфавита по созвучию с фамилиями этих ученых. Ее смысл: все элементы образовались раньше, чем появились сами звезды. В основе этой теории...

Впрочем, сначала обратимся к нашему старому знакомому — нейтрону. Как ведет себя свободный нейтрон, не связанный с другими частицами крепкими путами ядерных сил? Оказывается, он совсем не так устойчив, как хотелось бы думать. Он может превратиться в протон. Словом, нейтрон подвержен $\beta^-$-распаду. И период полураспада нейтрона очень мал: около 12 минут.

На этой особенности нейтрона и построили свои умозаключения Альфвен, Бете и Гамов. Их теория начиналась подобно сказке: «Давным-давно во Вселенной не было звезд. А вся материя космоса представляла собой огромный сгусток. Этот сгусток состоял из одних лишь нейтронов». Это «полинейтронное

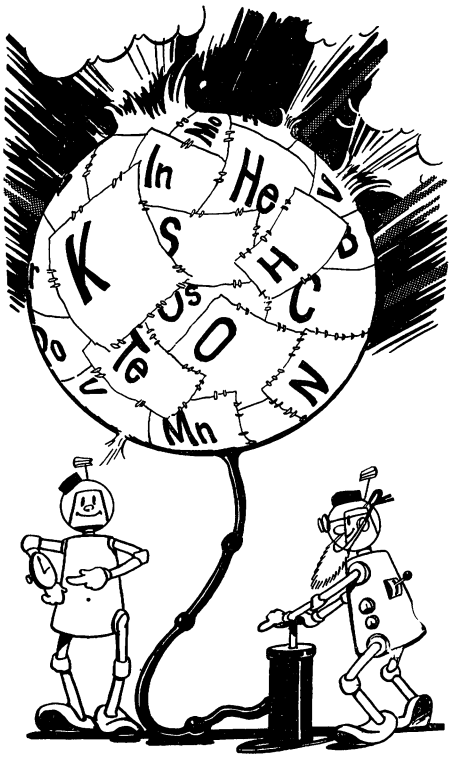



**Рис. 16. «Все элементы были созданы всего за 15 минут!» — провозгласила альфа-бета-гамма-теория. Увы, она оказалась подобной воздушному шару, который лопнул, не успев подняться...**

ядро» было сжато таким чудовищным давлением, что нейтроны даже не могли распадаться. Но время шло. «Ядро» постепенно начало расширяться. Нейтроны получили, наконец, некое подобие свободы. Первые нейтроны превратились в первые протоны. Протоны стали объединяться с нейтронами в ядра дейтронов — тяжелых изотопов водорода. Те в свою очередь поглощали новые нейтроны, и рождались разновидности водородных атомов с массовыми числами 3, 4, 5, 6 и более — ядра, чрезмерно перегруженные нейтронами. Но такие ядра, как мы знаем, предрасположены к $\beta^-$-распаду. Водород стал превращаться в гелий, а изотопы гелия начинали насыщаться нейтронами.

Так потянулась длинная цепь последовательных нейтронных захватов и $\beta^-$-распадов. И все изотопы всех химических элементов, вплоть до очень тяжелых, стали звеньями этой цепи. Альфа-бета-гамма-теория успешно объяснила ход кривой космической распространенности элементов, а ведь правильное объяснение этой кривой — «пробный камень» вообще всех теорий происхождения элементов. Но

главная сенсация была впереди. Математические расчеты позволили вычислить, сколько времени потребовалось бы на весь этот невообразимо гигантский процесс. Не миллиарды, не сотни тысяч лет, даже не дни. Всего-навсего— 15 минут. За четверть часа должны были образоваться из нейтронного «ничто» все известные во Вселенной химические элементы! За 15 коротких минут, и не более, потому что потом осталось бы слишком мало свободных нейтронов и наступил бы логический конец синтеза.

Но эффектные теоретические построения Альфвена и его коллег не могли объяснить два мелких факта. Ведь в ходе захвата нейтронов должны были образоваться все без исключения изотопы химических элементов. В том числе гелий-5 и бериллий-8. Но ядра этих элементов характерны тем, что о них нечего сказать. Теоретики подсчитали: ядро бериллия-8 может существовать всего $10^{-16}$ секунды, число, мало доступное воображению. А гелий-5 неустойчив совершенно. Однако без этих ядер, без их непременного образования альфа-бета-гамма теория обойтись не могла. Из цепи вырывалось два звена, и цепь распадалась.

Новый путь к синтезу элементов тяжелее гелия завел в тупик. И выход из этого тупика обнаружился самым неожиданным образом.

## КЛЮЧ ДАЕТ ТЕХНЕЦИЙ

Элемент технеций ученые сначала синтезировали в 1937 г. искусственно. Только в 1961 г. его следы обнаружились в земных минералах. Но уже в 1950 г. технеций подал весть о своем существовании с ослепительной поверхности Солнца. Его следы обнаружила в солнечном спектре Шарлотта Мур — американский астрофизик. Затем присутствие технеция в некоторых звездах доказал англичанин Меррил (рис. 17). Это событие бросило новый свет на проблему происхождения химических элементов.

Звезды живут миллиарды лет. Период полураспада самого долгоживущего изотопа — технеция — около 2 млн. лет. «Солнечные» условия не способны продлить его жизнь. Ведь на радиоактивный распад не влияют самые высокие температуры. Сопоставление этих двух фактов рождает загадку. Откуда берется технеций на Солнце и в звездах? Почему он существует сейчас, если уже давным-давно должен был распасться?

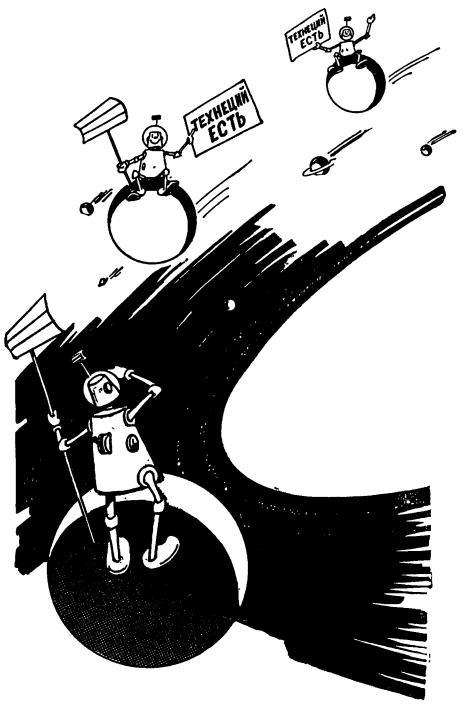



Рис. 17.

Вывод может быть только один: и поныне технеций непрерывно образуется на Солнце и в звездах. А раз так, то должны существовать в звездах такие условия, которые благоприятны для синтеза элементов тяжелее гелия.

## ОТ ГЕЛИЯ ДО ВИСМУТА

Звезды — не мертвые тела. Они живут и в своем развитии проходят разные стадии — стадии эволюции, как говорят астрофизики. На первой стадии в ядре звезды протекает термоядерная реакция «сгорания» водорода в гелий. Этот процесс тянется миллион лет. Постепенно «запасы» водорода в центре звезды сходят на нет, зато гелия становится все больше и больше. Состав ядра и состав оболочки звезды становятся различными.

И тут звезда изменяет свое доселе спокойное поведение. Ее оболочка начинает расширяться, а ядро, напротив, сжимается. Сжатие повышает температуру, и она достигает в центре звезды 150 млн. градусов.

Теперь синтез химических элементов может перескочить гелиевый «барьер». Ядра гелия начинают сливаться друг с другом, и включается механизм так называемого альфа-синтеза. К образующимся ядрам присоединяются новые

α-частицы. Сначала три α-частицы сливаются в ядро углерода-12. Дальнейшую цепочку синтеза мы в терминах ядерной физики можем записать так:

$$C^{12}(\alpha, \gamma)O^{16}(\alpha, \gamma)Ne^{20}(\alpha, \gamma)Mg^{24},$$

где γ означает испускание гамма-лучей.

Мы оборвали эту цепочку на магнии не случайно. Тут α-синтез прекращается, потому что 150 млн. градусов не хватает для образования последующих элементов.

Но ведь до технеция α-синтез так и не дошел. У магния порядковый номер 12, у технеция — 43. Разница между ними равна 31. Еще тридцать один элемент каким-то путем должен был образоваться, чтобы технеций мог салютовать земным ученым с далеких звездных миров...

Быть может, звезда за счет чего-то получает дополнительный подогрев? Однако за счет чего именно? Ведь теперь речь идет о температурах уже в миллиарды градусов. Только в этом случае образование элементов может шагнуть за магний. Где найти такое громадное количество тепла — совершенно неясно.

Хотя альфа-бета-гамма-теория лопнула как мыльный пузырь, от нее осталась вполне материальная «капля». В этой «капле» сосредоточилось то единственно ценное, что было в злополучной теории: синтез химических элементов проходит с участием нейтронов.

Нейтрон, как мы знаем, — всемогущее орудие при осуществлении ядерных реакций. Ему безразлично, каковы внешние условия: царит ли сковывающий холод или нестерпимый жар. Он с одинаковым успехом добирается до атомного ядра. Если допустить, что в дело вмешивается процесс захвата нейтронов, тогда цепочка синтеза элементов потянется дальше. Для этого нужны свободные нейтроны, много свободных нейтронов. Их источники должна была отыскать изобретательная мысль ученых.

В звездах существуют ядра двух атомов: углерода-13 и неона-21. Они образуются на предыдущих стадиях эволюции звезды. Как именно — вопрос сложный. Мы не будем на нем задерживаться. Примем сам факт.

Можно представить себе, что ядро углерода-13 как бы составлено из трех альфа-частиц плюс один нейтрон. В ядре неона-21 пять альфа-частиц терпят нежелательное соседство единственного нейтрона. Нежелательное потому, что ядра, состоящие целиком только из альфа-частиц, очень устойчивые системы (кроме бериллия-8). Нейтрон же в этих ядрах — как инородное тело, и они стремятся от него избавиться, поменяв на альфа-частицу. Словом, происходят ядерные реакции:

$$C^{13}(\alpha, n)O^{16} \quad \text{и} \quad Ne^{21}(\alpha, n)Mg^{24}.$$

Для синтеза элементов появляется вполне достаточное количество свободных нейтронов.

Теперь-то и вступает в действие тот механизм, которым пыталась объяснить образование всех элементов альфа-бета-гамма-теория. Начинается процесс медленного захвата нейтронов. Медленного потому, что промежуток времени между двумя последовательными захватами нейтронов велик по сравнению с периодами полураспада образующихся изотопов. Только изотопы с большими периодами полураспада способны к дальнейшим превращениям. Менее долговечные изотопы превращаются в стабильные раньше, чем успеют захватить очередной нейтрон. Так рождаются многие элементы, в том числе и технеций.

Этот механизм синтеза элементов выключается на висмуте (порядковый номер 83). Следующие за ним элементы недолговечны. Они распадаются раньше, чем получают возможность захватить нейтрон.

## РОЖДЕНИЕ И ГИБЕЛЬ СВЕРХНОВЫХ ЗВЕЗД

Эти события случаются буквально раз в столетие. В далеком уголке небесной бездны неожиданно вспыхивает звезда необычной яркости. С каждым днем она теряет свой блеск, тускнеет, невооруженный глаз теряет способность разглядеть ее. И, наконец, исчезает. Почти так же неожиданно, как и появилась. Словно и не было никакой вспышки. Такие удивительные звезды астрономы и астрофизики называют **Сверхновыми.**

Взрыв Сверхновой — настоящая космическая катастрофа. При ее вспышке выделяется чудовищное количество энергии. По самой грубой оценке оно могло бы образоваться при одновременном взрыве многих миллиардов самых мощных водородных бомб. Ученые пока не могут объяснить истинную причину появления Сверхновых. А понять эту причину было бы крайне важно для окончательного выяснения картины происхождения элементов.

Светимость Сверхновых спадает согласно определенному закону: ее величина через определенный интервал уменьшается в одно и то же количество раз. Такой вид изменений

в природе встречается часто. К ним относится и радиоактивный распад. Через время, равное периоду полураспада, начальное количество радиоактивного вещества уменьшается вдвое. И в два раза меньшим становится суммарное значение энергии распада.

Оказалось, что через каждые 55 дней Сверхновые звезды делаются вдвое менее яркими. Такое убывание светимости Сверхновой навело ученых на смелую мысль. А что если выделение энергии после взрыва Сверхновой объяснить радиоактивным распадом какого-нибудь изотопа с периодом полураспада в 55 дней? Из тысячи известных радиоактивных изотопов оказались подходящими только два: бериллий-7 и стронций-89. Они распадаются наполовину как раз за 55 дней. Но та энергия, которая выделяется при их бета-распаде, так мала, что даже на краткий миг неспособна была бы обеспечить блеск Сверхновых, даже если допустить, что эти звезды почти целиком состоят из бериллия или стронция.

Новый претендент обнаружился среди элементов, которые были синтезированы учеными. Это был трансурановый элемент калифорний с порядковым номером 98. Его изотоп калифорний-254 удалось приготовить в количестве всего около 30 миллиардных долей грамма. Но и этой пылинки оказалось достаточно, чтобы измерить период полураспада: он оказался равным 55 дням.

И тогда появилась гипотеза: энергия самопроизвольного деления калифорния-254 служит источником светимости Сверхновой в течение почти двух лет — до тех пор, пока весь калифорний не распадется.

Но как синтезируется сам калифорний? Ведь мы остановились на том, что механизм образования элементов отключился на висмуте. Перед взрывом Сверхновой все ядерные реакции в звезде идут особенно интенсивно. В том числе и взаимодействие с альфа-частицами уже знакомого нам неона-21. За короткий промежуток времени рождается громадное количество нейтронов. Ядра успевают на этот раз поглотить нейтроны быстрее, чем произойдет их бета-распад. Неустойчивость элементов тяжелее висмута уже не станет мешать синтезу. Цепь превращений будет удлиняться и приведет к образованию очень тяжелых элементов, среди них и калифорния.

Ученые произвели любопытный расчет. Оказывается, при каждом взрыве Сверхновой образуется поистине фантастическое количество этого самого калифорния-254. Если его выразить в тоннах, то мы получим число, равное единице с 23 нулями. Это в 20 раз больше веса нашей Земли.

Совсем недавно выяснилось, что период полураспада калифорния-254 равен 60 дням. Смелая догадка оказалась под сомнением. Стало быть, нужна новая гипотеза.

... Гибнет Сверхновая— и на месте ее ослепительной вспышки останется лишь маленькая, тусклая звездочка. Она отличается необычайно высокой плотностью вещества. Эти «трупы» Сверхновых называют **«белыми карликами»**. Что с ними происходит далее, пока неизвестно. А то громадное количество материи, которое выбрасывается при взрыве Сверхновой в пространство Вселенной, может сгущаться и образовывать новые звезды. Эти звезды начнут новую жизнь, и в них будет происходить великий процесс синтеза элементов. Но, быть может, он пойдет иным путем, отличным от того, с которым мы познакомились.

Теория происхождения элементов еще очень далека от завершения. Многим поколениям ученых предстоит глубже и глубже познавать истину. Рождение, жизнь и смерть химических элементов — это гигантский единый процесс. И люди уловили эту закономерность природы пока только в самых общих чертах, как художник, который сделал на холсте первые мазки будущей картины: он знает, что будет писать, но еще не знает, как это будет выглядеть.

■

# АТОМНЫЙ РЕАКТОР

Когда говорят об атомном реакторе, невольно представляешь себе огромное здание электростанции (рис. 1), тысячетонную бетонную защиту, сложнейшую автоматику и обязательно высоченную трубу для сброса слегка радиоактивных газов в атмосферу. Между тем первые реакторы выглядели далеко не так монументально. И в современных реакторах главное не технические детали и не размеры.

Первоначально в английском языке атомный реактор назывался «pile», т. е. куча, штабель. Первые атом-

Рис. 1. Ново-Воронежская атомная электростанция.

ные реакторы действительно больше походили на штабели из графитовых кубиков, чем на современные сложнейшие сооружения. Но как в первом примитивном автомобиле уже был мотор, так и в этих первых штабелях урана и графита уже тлела цепная ядерная реакция.

Резерфорда, сделавшего немало открытий в области радиоактивности, однажды спросили, какой практический интерес могут представить его открытия. И великий ученый ответил: «Ровно никакого». Но вот в 1932 г. Джемс Чэдвик открыл нейтрон. Это был ключ почти ко всем атомным ядрам. В 1935 г. Фредерик Жолио-Кюри, получая Нобелевскую премию за открытие искусственной радиоактивности, сказал: «Мы отдаем себе отчет в том, что ученые, которые могут создавать и разрушать элементы, способны также осуществлять ядерные реакции взрывного характера».

Ученые долго не замечали способность ядер урана делиться. Ведь все другие элементы, облучавшиеся нейтронами, превращались в более тяжелые ядра, поэтому предполагалось, что и уран должен себя вести так же.

С 1935 по 1938 г. ученые пытались разобраться в сложных радиоактивных превращениях при облучении урана нейтронами. Летом 1938 г. Ирен Жолио-Кюри и Павле Савич установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникает вещество, очень похожее на лантан. В конце 1938 г. немецкие ученые Отто Ган и Фредерик Штрассман неопровержимо доказали, что при этом образуется барий, т. е. элемент, гораздо более легкий, чем уран. Барий и лантан могли получиться из урана только в результате деления его атомов; так было открыто деление ядер урана. Делиться так могут только ядра тяжелых атомов: тория, урана, плутония.

Посмотрите, что происходит с крупными каплями, падающими с крыши. Мелкие капли лишь пульсируют под напором встречного воздушного потока, а самые крупные быстро вытягиваются, становятся похожими на несимметричную гантель с перетяжкой и разделяются на две или несколько дочерних капель. То же самое происходит с крупными ядрами (рис. 2). Попавший в ядро нейтрон образует возбужденное ядро, оно становится неустойчивым и распадается на две, а в редких случаях и на три части. Деление ядер могут вызвать не только нейтроны. Очень быстрые протоны или электроны, $\gamma$-лучи с высокой энергией также могут вызвать деление ядер. Если налетающая частица обладает энергией в сотни миллионов электрон-вольт, она может вызвать деление даже легких ядер, например ядер атомов кислорода. В наше время уже можно вызвать деление почти любого ядра.

Между делением тяжелых и легких ядер очень большая разница: уран делится нейтронами, обладающими ничтожной тепловой энергией, но при этом высвобождается громадная энергия — 200 млн. электрон-вольт от каждого разделившегося ядра!

Чем меньше атомный вес элемента, тем больше энергии надо затратить, чтобы разделить его ядро. При делении ядра в атоме серебра выигрыш в энергии сокращается до нуля. Деление ядра в элементах с небольшим атомным номером даст уже не выигрыш, а проигрыш в энергии.

В средней части таблицы Менделеева существует область наиболее устойчивых стабильных атомных ядер. Для более тяжелых ядер энергетически выгодно распадаться на более легкие, а для более легких — соединяться в более тяжелые ядра.

На рисунке 3 изображен график энергии связи для каждой частицы всех устойчивых изотопов менделеевской таблицы. Величина энергии связи равна работе, которую надо затратить, чтобы разложить систему на ее составные части. По этому графику можно рассчитать, какое количество энергии выделяется или поглощается при ядерном превращении.

Например, для урана-235 энергия связи на один нуклон равна $7{,}6 \cdot 10^6$ *эв* (электрон-вольт), значит, полная энергия связи ядра $U^{235}$ равна $7{,}6 \cdot 10^6 \cdot 235 \approx 1{,}8 \cdot 10^9$ *эв*. Для ядра, массовое число которого (число нуклонов в ядре) около 120, энергия связи на один нуклон равна $8{,}5 \cdot 10^6$ *эв* и полная энергия связи такого ядра равна $10^9$ *эв*.

Теперь легко подсчитать, что при делении урана-235 на два равных осколка выделится энергия $2 \cdot 10^9$ *эв* — $1{,}80 \cdot 10^9$ *эв* $\approx 2 \cdot 10^8$ *эв*.

Этот же график показывает, что легким ядрам выгодно соединяться в более тяжелые. Это именно и происходит при термоядерных процессах.

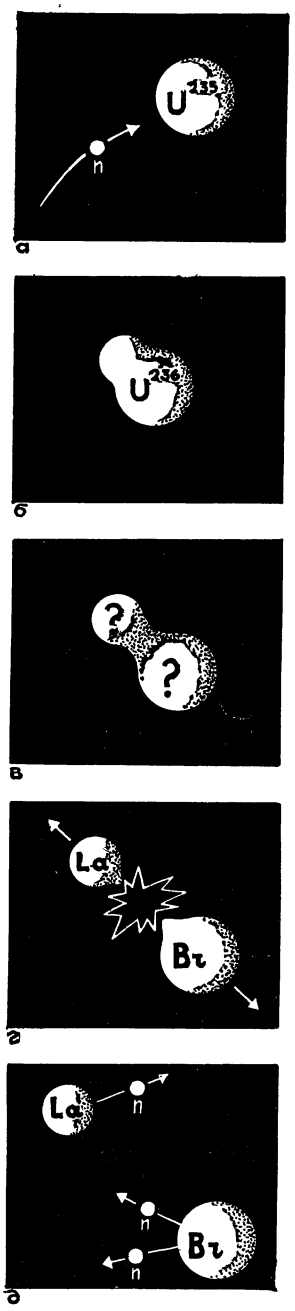



**Рис. 2. Деление атома урана: *а* — нейтрон захватывается ядром $U^{235}$; *б* — образуется возбужденное ядро $U^{236}$; *в* — начало процесса деления; какие образуются осколки, еще неизвестно; *г* — ядро разделилось на два неравных осколка, осколки отталкиваются друг от друга, потому что у обоих положительный заряд; *д*—осколки испускают вторичные нейтроны.**

Сразу же после того, как было открыто деление урана, физики установили, что оно интересно не только очень большой выделяющейся энергией, но и тем, что при делении возникают вторичные нейтроны. Если, например, разделить ядро $_{92}U^{238}$ пополам, получается два ядра палладия $_{46}Pd^{119}$. Но в природе существуют только изотопы палладия с массовым числом не более 110. Значит, в каждом из получившихся ядер по 6 «лишних» нейтронов. Эти ядра палладия (осколки деления) будут радиоактивны, а часть нейтронов может при делении сразу же быть отброшенной. Так оно и происходит на самом деле. При делении ядер урана-235 отбрасываются в среднем 2,5 нейтрона, «не уместившихся» в разлетающихся осколках.

Как только были открыты вторичные нейтроны, стало ясно, что при делении урана возможна цепная реакция. Ведь если один нейтрон вызовет одно деление, то следующие 2,5 нейтрона вызовут 2,5 деления и т. д.! Можно было предположить, что стоит взять достаточно большой кусок чистого урана (чтобы доля улетающих наружу нейтронов была невелика), и цепная реакция приведет его к взрыву.

Если бы оказалось так, то атомная бомба была бы создана уже в 1939 г. Но ученые установили, что лишь один природный изотоп урана — уран-235 делится при попадании в него любых нейтронов, а этого изотопа в природном уране лишь 0,7%. Основная масса урана — уран-238 делится лишь под действием «быстрых» нейтронов, энергия которых более миллиона электрон-вольт и скорость более 14 000 *км/сек*. У вторичных нейтронов, испускаемых делящимися ядрами, более высокая энергия. Они могли бы делить и уран-238, но природа подстроила им «ловушку». При столкновении с атомами урана у нейтронов гораздо больше шансов возбудить их и отдать им часть своей энергии, чем разделить. Поэтому в уране-238 вторичные нейтроны хоть и могут вызвать деления, но в небольшом количестве. Цепная реакция развиваться в нем не будет.

## ЖИЗНЬ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ

Если бы мы захотели вскипятить чайник, зажигая под ним спички одну за другой, то напрасно потеряли бы время; точно с таким результатом можно облучать небольшой кусок урана нейтронами: будет происходить большое количество делений, но кусок урана не только не взорвется, а даже не нагреется. Ведь для выделения тепловой мощности всего в один ватт в уране должно происходить ни много ни мало $3{,}1 \cdot 10^{10}$ делений в секунду!

Чтобы получить в атомном реакторе от реакции деления большое и постоянное количество тепла, нужно, чтобы уран все время облучался очень мощным потоком нейтронов. Эти нейтроны могут быть только вторичными, возникшими при делении урана, потому что у нас нет других таких мощных нейтронных источников. Значит, одно «поколение» нейтронов, сменяя другое, должно быть количественно равным ему. При делении возникает в 2,5 раза больше нейтронов, чем расходуется. Чтобы следующее поколение нейтронов было таким же, как предыдущее, нужно, чтобы из всех возникших вторичных нейтронов ровно столько же израсходовалось на деление ядер урана, а избыток — на другие процессы.

Проследим за короткой жизнью нейтронов в атомном реакторе.

Нейтроны, рождающиеся при делении урана, называются быстрыми нейтронами. Их энергия равна приблизительно миллиону электрон-вольт, а скорость — 14 000 *км/сек*. Быстрые нейтроны не очень активно делят уран-235. Чтобы вызвать деление, быстрый нейтрон должен пролететь в куске урана-235 в среднем 8 *см*. В природном уране, до того как быстрому нейтрону удастся разделить ядро урана-235, он должен пролететь 11,5 *м*! На самом же деле нейтрон не может пролететь такое расстояние; он гораздо раньше поглощается ядрами урана-238. Поэтому в сплошной массе естественного урана быстрые нейтроны, рождающиеся при делении, не могут вызвать цепную реакцию.

Совсем иначе ведет себя попавший в уран медленный нейтрон. Его энергия равна 0,025 электрон-вольт и скорость всего 2,2 *км/сек*. В куске чистого урана-235 такой нейтрон вызовет деление уже на пути в 0,33 *мм*! Чтобы вызвать деление в куске природного урана, медленному нейтрону достаточно пробежать всего 4,7 *см*. На таком коротком пути у нейтрона уже гораздо меньше шансов пропасть, поглотившись в уране-238, так как средний пробег медленного нейтрона в уране-238 до поглощения — 7,2 *см*.

Посмотрим, что произойдет, если все быстрые нейтроны, вылетающие из делящихся атомов урана, превратятся в медленные. При каждом делении урана образуется 2,5 быстрых нейтрона. Если мы замедлим их без потерь — получим 2,5 медленных нейтрона. Медленные нейтроны расходуются в природном уране на три основных процесса: деление урана-235, поглощение в уране-238 и поглощение в уране-235 без деления, но с образованием урана-236. Ученые вычислили вероятность этих трех процессов. На пути в 1 *см* вероятность поглощения нейтрона, приводящего к делению,— 0,21, поглощения в уране-238 — 0,14 и, наконец, погло-

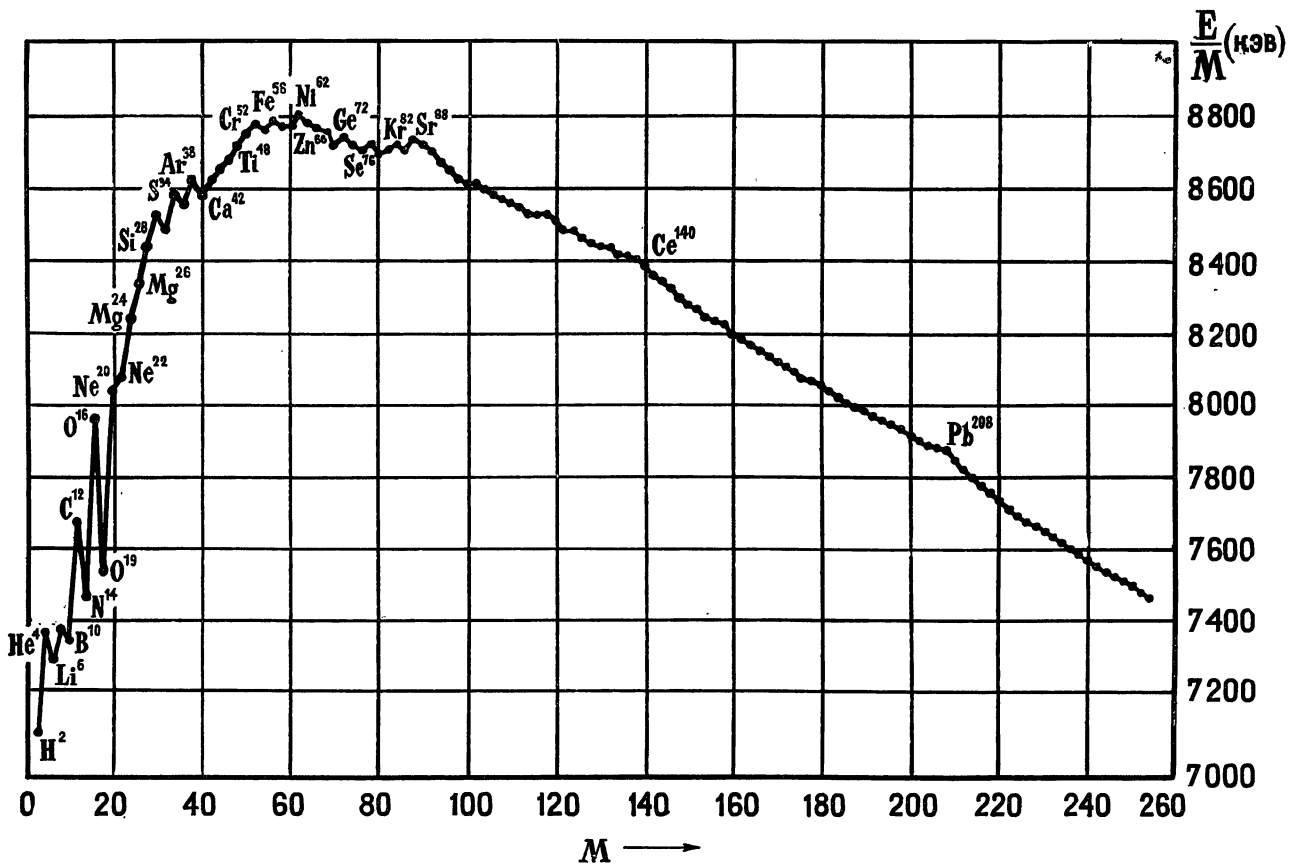



**Рис. 3. График энергии связи для устойчивых изотопов.**

щения в уране-235 — 0,04. Коэффициент использования медленных нейтронов для деления урана будет равен отношению вероятности деления к вероятности потери нейтрона:

$$\eta = \frac{0{,}21}{0{,}21 + 0{,}14 + 0{,}04} = 0{,}54.$$

Значит, если бы мы могли замедлить нейтроны без потерь, каждое деление в уране вызывало бы 2,5.0,54=1,35 новых делений: «коэффициент размножения» нейтронов в такой системе был бы гораздо больше единицы и атомный реактор мог бы работать.

Чтобы замедлить нейтроны, уран в реакторах окружают толстым слоем замедлителя: графита, тяжелой воды, бериллия или других веществ. Сталкиваясь с атомами замедлителя, нейтроны передают им часть своей энергии и постепенно замедляются. Чтобы замедлиться от энергии в миллион электрон-вольт до 0,025 электрон-вольт, нейтрон должен испытать в обычной воде 18 соударений с атомами водорода, в тяжелой воде — 25, в графите — 110 соударений с атомами углерода, в бериллии — 82 соударения с его атомами. Казалось бы, самый лучший замедлитель — обыкновенная вода, но обычный водород довольно сильно поглощает нейтроны. Самый лучший замедлитель нейтронов — тяжелая вода, за ней графит, на третьем месте— бериллий.

В процессе замедления часть нейтронов, конечно, теряется. Расчеты физиков показали: если смешать порошок графита и урана, то потери будут слишком большими; потери можно сделать гораздо меньшими, если стержни из урана поместить в чистый графит. Наиболее выгодное соотношение между графитом и ураном: один атом урана на 150 атомов углерода. Удалось рассчитать ученым и оптимальные размеры урановых стержней: диаметр примерно 3 *см*, а наилучшее расстояние между стержнями около 20 *см*. В такой уран-графитовой системе коэффициент размножения нейтронов равен 1,13. Этот коэффициент уже совсем ненамного превышает единицу. Но мы еще не учли, что часть нейтронов будет вылетать из реактора наружу. Если сделать реактор очень большим, долю вылетающих нейтронов можно уменьшить до 3—5%. Это соответствует кубическому реактору с длиной ребра в 6—8 *м* (900—1600 стержней). Графитовые отражатели толщиной в 40—60 *см* частично вернут обратно нейтроны, покидающие «активную зону» реактора. Вес урановой загрузки такого реактора достигает 200 *т*, а общий вес активной зоны и отражателя превышает 1000 *т*.

Работающий атомный реактор выделяет очень много тепла, его надо охлаждать. Обычно его охлаждают водой, но, так как уран химически реагирует с водой, приходится урановые стержни помещать в алюминиевые чехлы и мириться с тем, что в реакторе, кроме гра-

фита и урана, будет еще какое-то количество алюминия и воды, поглощающих нейтроны. В результате избыток коэффициента размножения нейтронов оказывается совсем небольшим — на 5—8% больше единицы. Если детали реактора будут сделаны из не совсем чистых материалов, то он может и вовсе не заработать. Поэтому в строительстве реакторов применяются только высококачественные материалы.

## КРИТИЧЕСКАЯ МАССА РЕАКТОРА

Вот постройка нового атомного реактора закончена, и в готовую графитовую решетку загружают урановые стержни (рис. 4 и 5). Коэффициент размножения нейтронов постепенно нарастает. Когда он достигнет 0,8—0,9, в один из пустых каналов опускают источник нейтронов и включают измерительную аппаратуру. Постепенно, по мере приближения коэффициента размножения к единице, число нейтронов, регистрируемых специальными счетчиками, становится все больше и больше и, наконец, мощность начинает медленно нарастать, даже если убрать из реактора источник нейтронов, — физики говорят: «реактор достиг критичности», или: «достигнута необходимая критическая масса». Иногда критическая масса достигается не изменением общей массы урана, а резким уменьшением поверхности системы — тем самым уменьшается и доля вылетающих из системы нейтронов. Типичный пример такого реактора — атомная бомба, в ней «критическая масса» достигается сближением двух урановых полусфер.

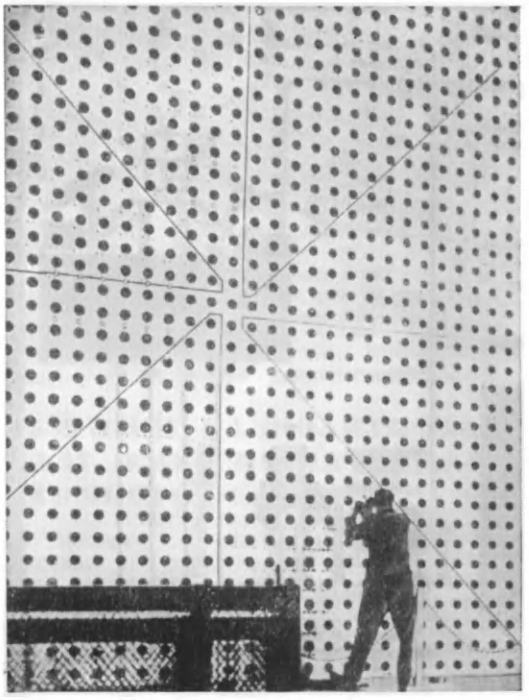


**Рис. 4. Бетонная защита Брукхейвенского (США) атомного реактора с отверстиями для загрузки урановых блоков и облучаемых материалов.**

**Рис. 5. Загрузка урановых блоков в атомный реактор. Каждый урановый блок покрыт алюминиевой оболочкой, имеет длину 10 *см*, а вес — 1,25 *кг*.**

## РЕГУЛИРОВКА МОЩНОСТИ АТОМНОГО РЕАКТОРА

Атомный реактор нужно уметь выводить на заданную мощность, удерживать на ней и в нужный момент прекращать цепную реакцию (рис. 6). Чтобы мощность реактора увеличилась, достаточно сделать коэффициент размножения нейтронов чуть больше единицы. В каждом реакторе небольшая часть каналов предназначена не для урановых стержней, а для стержней регулирующих или стержней аварийной защиты. Эти стержни делают из вещества, сильно поглощающего нейтроны: в маломощных реакторах — из легкоплавкого кадмия, а в реакторах мощных, работающих на промышленность,— чаще всего из стали с добавкой бора, сильно поглощающего нейтроны. Регулирующие стержни приводятся в действие электромашинными устройствами, связанными со счетчиками нейтронов. Как только мощность реактора падает, регулирующие стержни поднимаются выше, если же мощность слишком нарастает — опускаются и поглощают избыточные нейтроны.

Стержни аварийной защиты обычно подвешены над пустыми каналами на электромагнитах. Стоит случиться какой-либо неисправности — прервется подача электроэнергии или появится активность в охлаждающей воде, как цепь питания электромагнитов разорвется и стержни почти мгновенно остановят мощный реактор.

## ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ

Смена нейтронных «поколений» в реакторе происходит за тысячные доли секунды, поэтому даже очень небольшое изменение коэффициента размножения нейтронов вызывало бы сильные колебания в мощности реактора, если бы не запаздывающие нейтроны. Более 99% нейтронов испускается при делении мгновенно, но 0,7% — с запаздыванием от десятых долей секунды и до 55 секунд. Запаздывающие нейтроны играют роль буфера, смягчающего колебания в мощности реактора. До тех пор пока коэффициент размножения нейтронов не выходит за пределы между 0,993 и 1,007, запаздывающие нейтроны не дают реактору слишком быстро умень-

шать или увеличивать мощность, и это намного облегчает управление и увеличивает безопасность его работы. Если же в результате крупных неполадок коэффициент размножения нейтронов выйдет за указанные пределы, запаздывающие нейтроны уже не смогут удержать реактор от очень быстрой остановки или очень быстрого увеличения мощности. Тогда начинают действовать регулирующие или аварийные стержни.

## ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В АТОМНОМ РЕАКТОРЕ

Атомный реактор — настоящая фабрика новых элементов и изотопов периодической системы (рис. 7). Атомы урана при делении разлетаются на осколки. Если бы каждое из ядер урана делилось точно поровну, из него получилось бы два ядра элемента 46, т. е. палладия. Но чаще всего атом урана делится на два неравных осколка. В результате деления получаются практически все элементы с атомным весом от 70 до 160. Все осколки деления содержат избыточное число нейтронов и поэтому радиоактивны. Распадаясь, они испускают $\beta^-$-частицы и $\gamma$-лучи и превращаются при каждом распаде в элементы с зарядом, на единицу большим, до тех пор, пока не будет достигнуто устойчивое соотношение протонов и нейтронов. Вот некоторые из осколков деления урана и их периоды полураспада: рубидий-86 — 18 дней, цезий-137 — 27 лет, стронций-90 — 28 лет, барий-140 — 12,8 дня, серебро-111 — 7,5 дня, кадмий-115 — 43 дня.

На деление атомов урана идет лишь две пятых нейтронов, рождающихся в реакторе. Остальные три пятых захватываются материалами активной зоны, отражателя и защиты реактора. Нейтроны, захваченные ураном-238 и ураном-235, приводят к образованию урана-239, превращающегося с периодом 23 минуты в нептуний-239, и затем с периодом 2,3 дня—в плутоний-239 (период полураспада 24 100 лет) и в небольшое количество урана-236 с периодом полураспада около 24 млн. лет. Таким образом, плутоний-239 и уран-236 накапливаются в атомном горючем. Накапливающийся в облучаемом уране плутоний продолжает подвергаться облучению. При этом примерно две трети его атомов, захватывая нейтроны, делятся, как и атомы урана-235, а одна треть, захватывая нейтроны, превращается в более тяжелые изотопы — плутоний-240. Если и плутоний-240 захватит нейтрон, то получится $\beta^-$-радиоактивный плутоний-241 (период полураспада 13 лет), который превращается в следующий заурановый элемент — америций.

Какая-то часть нейтронов захватывается в атомном реакторе конструкционными материалами: сталью,

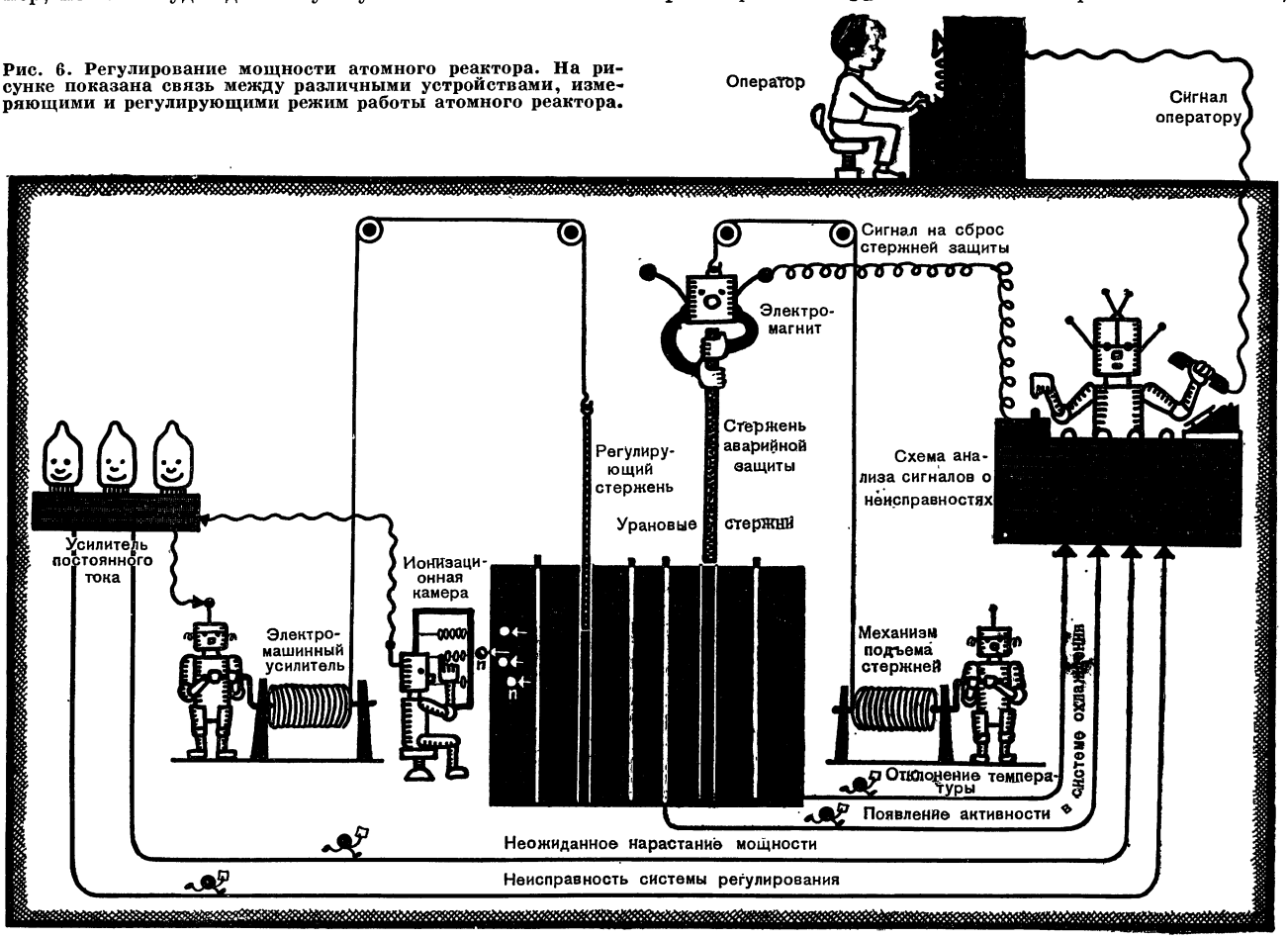



**Рис. 6. Регулирование мощности атомного реактора. На рисунке показана связь между различными устройствами, измеряющими и регулирующими режим работы атомного реактора.**

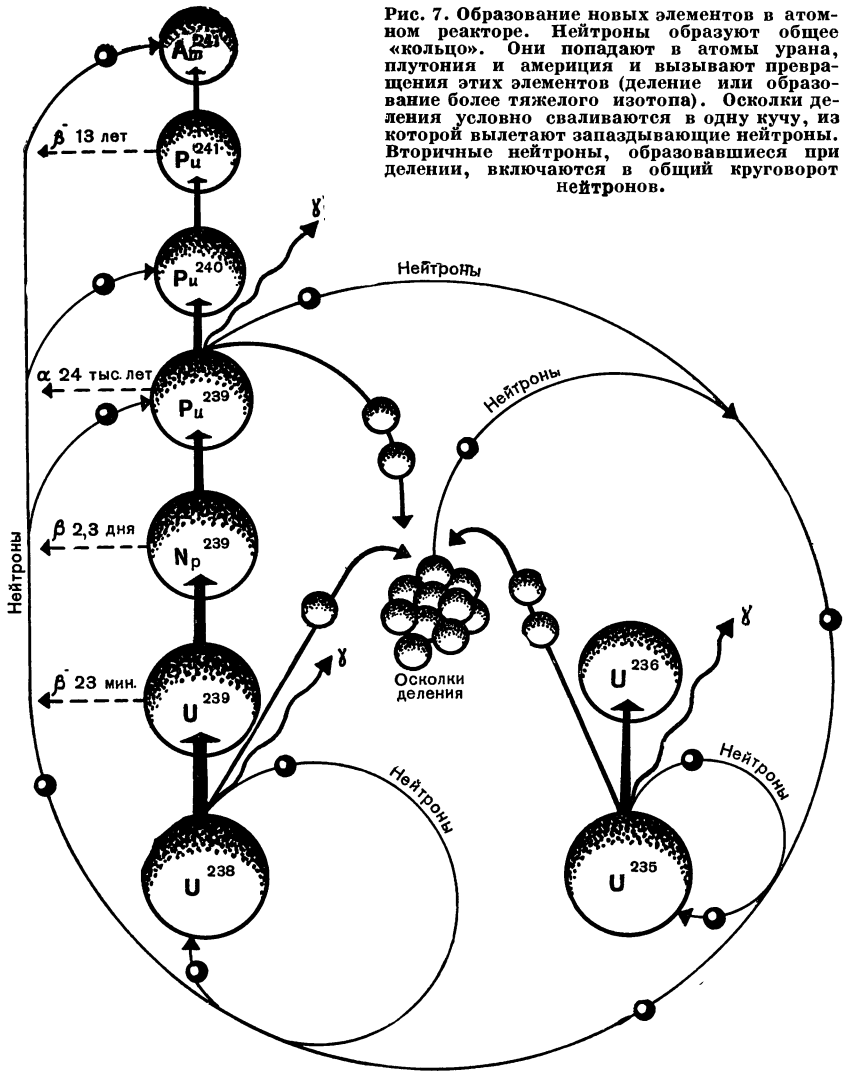



**Рис. 7. Образование новых элементов в атомном реакторе. Нейтроны образуют общее «кольцо». Они попадают в атомы урана, плутония и америция и вызывают превращения этих элементов (деление или образование более тяжелого изотопа). Осколки деления условно сваливаются в одну кучу, из которой вылетают запаздывающие нейтроны. Вторичные нейтроны, образовавшиеся при делении, включаются в общий круговорот нейтронов.**

алюминием, цирконием. Образуются радиоактивные изотопы железа, никеля, хрома, кобальта, циркония и т. д.; почти все материалы, побывавшие в атомном реакторе, становятся радиоактивными.

## ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА МАТЕРИАЛЫ АТОМНОГО РЕАКТОРА

Мощное излучение атомного реактора не только вызывает превращения элементов, но и нарушает структуру материалов, из которых он изготовлен. Особенно сильно облучается само атомное горючее — уран. Его пронизывают осколки деления, нейтроны, β-частицы и γ-лучи. Под действием облучения уран становится хрупким, распухает, деформируется, нержавеющая сталь также становится более хрупкой. Графит при облучении быстрыми нейтронами увеличивается в размерах, вода медленно разлагается на водород и кислород. Совершенно не выносят мощное облучение пластмассы, полупроводники, электрические кабели, поэтому все эти материалы нуждаются в толстом слое защиты. Самая сложная задача при конструировании атомного реактора — сделать его урановые тепловыделяющие элементы такими надежными, чтобы ни один из нескольких тысяч элементов не вышел из строя из-за какой-либо неполадки, связанной с облучением деталей реактора.

## ПЕРЕРАБОТКА АТОМНОГО ГОРЮЧЕГО

Атомный реактор, работающий на мощности в один миллион киловатт, потребляет в сутки 1 *кг* урана-235. Количество урана-235 в атомном горючем постепенно уменьшается, а количество плутония и осколков деления возрастает. Многие осколки деления сильно захватывают нейтроны, и если уран время от времени не заменять, то реактор остановится: цепная реакция прекратится.

Урановые тепловыделяющие элементы извлекают из реактора и отправляют на химические заводы для переработки. Там их растворяют в кислоте, и полученный радиоактивный раствор подвергают разделению. Обычно уран в виде уранилнитрата $UO_2(NO_3)_2$ извлекается из водного раствора диэтиловым эфиром или трибутилфосфатом.

Оставшиеся в водной фазе плутоний и осколки деления разделяют и направляют на переработку или хранение, а уранилнитрат превращают либо в металлический уран для повторного использования в реакторе, либо в летучее соединение — гексафторид урана $UF_6$, который обогащают на специальных установках изотопом $U^{235}$.

## РАЗЛИЧНЫЕ АТОМНЫЕ РЕАКТОРЫ

Атомные реакторы применяются сейчас для самых различных целей: для получения электроэнергии на атомных станциях, для облучения материалов, изготовления радиоизотопов, для получения плутония или мощных потоков нейтронов и гамма-лучей. Поэтому нужны различные типы атомных реакторов.

Для научных целей чаще всего строят небольшие реакторы, содержащие всего несколько десятков килограммов урана, обогащенного ураном-235. Мощность этих реакторов от одной тысячи до 20 тыс. *квт*. В таких реакторах активная зона пронизана каналами для вывода нейтронных пучков и облучения ими различных веществ. Обычно эти реакторы охлаждаются водой и имеют низкую температуру.

Для производства электроэнергии нужно строить реакторы, имеющие высокую температуру: 300 —500°Ц. Уран заключают в оболочку из нержавеющей стали или циркония, а воду подают под давлением до 100 *атм*.

Для природного или слабообогащенного урана можно строить только реакторы на медленных нейтронах. Эти реакторы дают на каждый затраченный атом урана-235 примерно 0,8 атома плутония, или, как говорят, их коэффициент воспроизводства горючего равен 0,8.

Если применить в реакторе сильно обогащенный уран, можно убрать замедлитель, поглощающий часть нейтронов, и сделать коэффициент воспроизводства горючего больше единицы — до 1,4. Здесь нет никакого противоречия: ведь плутоний в реакторе образуется не из урана-235, а из урана-238. Если образовалось 1,5 *кг* плутония, то исчезло столько же урана-238; но, главное, с помощью реактора с расширенным воспроизводством можно сделать полезным весь уран-238. В обычном реакторе это сделать нельзя: как только концентрация урана-235 упадет, весь обедненный уран становится бесполезным. В реакторе же с расширенным воспроизводством уран-238 используется полностью. Вместо выгоревшей части урана-235 можно добавить (после химической переработки) столько же плутония, который образовался в этом же топливе. Часть плутония высвободится для других целей. Поэтому будущее атомной энергетики — за реакторами на быстрых нейтронах. Но такие реакторы охлаждают жидким натрием, а не водой: ведь она замедляет нейтроны.

С помощью атомного реактора можно использовать и другое природное атомное сырье — торий. Торий при облучении в атомном реакторе превращается в протактиний, а затем в уран-233.

Уран-233 — еще более хорошее топливо, чем уран-235. Цикл $Th^{232} \rightarrow U^{233}$ может дать расширенное воспроизводство даже с помощью реакторов на медленных нейтронах. В недалеком будущем это новое атомное сырье станет обычным.

■

## «Ромашка» — реактор-термоэлектрогенератор

**Американские ученые ставят на некоторые из своих искусственных спутников Земли атомные термобатареи. В центре такой батареи расположен контейнер с радиоактивным элементом, например церием-144. Энергия распада церия переходит в тепло, контейнер оказывается все время нагретым до нескольких сот градусов, а прижатые к нему спаи полупроводниковых термопар дают ток. Пока что американцам удалось создать термобатареи мощностью не более 100 *вт*.**

**В советском реакторе «Ромашка» нет никаких движущихся частей. Активная зона реактора состоит из пластин графита и дикарбида урана $UC_2$, отражатель нейтронов изготовлен из бериллия. Максимальная температура в центре реактора 1770° Ц. На реактор надевается термоэлектрический преобразователь, термопары которого изготовлены из кремний-германиевого сплава, устойчивого к действию излучений реактора. «Ромашка» проработала к 18 ноября 1964 г. 2500 часов и выработала более 1000 *квт·ч* электроэнергии, и все это без малейшей неисправности в работе! О постройке «Ромашки» советские ученые доложили на 3-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии.**

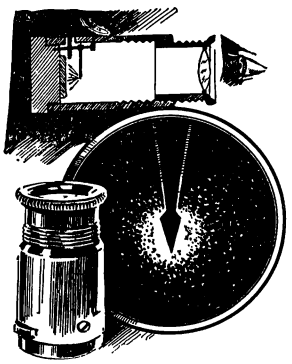
## ТЭС-3 — самоходная атомная электростанция

**Если геологи открыли новое месторождение в таежной глуши или в южной пустыне, если произошло где-нибудь стихийное бедствие—может оказаться срочно нужной электроэнергия. Советские ученые Н. М. Синев, А. К. Красин и другие создали самоходную атомную электростанцию ТЭС-3 мощностью 1500 *квт*. Первая такая станция была введена в строй вблизи первой в мире атомной электростанции в г. Обнинске в 1961 г. Все оборудование ТЭС-3 размещено на четырех самоходных платформах на гусеничном ходу. ТЭС-3 подвозится по железной дороге, а затем идет своим ходом по любой местности. Там, где нужна электроэнергия, блоки станции ставят в траншею и засыпают сбоку землей, соединяют все кабели и трубопроводы — и станция вступает в строй. ТЭС-3 может проработать без замены уранового топлива целый год.**

# КАК ВИДЯТ НЕВИДИМОЕ
## (Приборы ядерной физики)

Размеры ядерных частиц так малы, что увидеть их невозможно даже с помощью электронного микроскопа. Поэтому ученые в процессе исследования элементарных частиц отмечают не саму частицу, а только факт ее появления в определенной среде — ее след («трек»)

Впервые это удалось сделать с помощью **спинтарископа.** В этом приборе альфа-частицы попадают на экран, покрытый люминесцирующим веществом, чаще всего сернистым цинком. В точке попадания возникает вспышка, так называемая сцинтилляция.



Спинтарископ Крукса.

Спинтарископ дал возможность подсчитывать альфа-частицы, испускаемые радиоактивным препаратом. Исследователь часами, не спуская глаз с экрана, считал на нем вспышки. Это, конечно, утомительно, да и результаты не всегда получались точные. Ведь они зависели от зрения ученого: сколько тот сумеет увидеть, столько частиц и зарегистрирует. В наше время вспышки считает уже не человек, а специальное сложное устройство — **сцинтилляционный счетчик.**

## СТОЛОВЫЙ ПРИБОР

На одной научной конференции демонстрировалось необычное устройство: вилка и нож, зажатые в штативах, несколько электрических батарей и электромагнитный счетчик. Как только к этому странному сооружению подносили радиоактивный препарат, счетчик начинал щелкать, отсчитывая импульсы возникающего тока. Вилку и нож можно было заменить любыми металлическими предметами — ложкой, ножницами, гвоздями.

Два металлических предмета в этом приборе — электроды, к ним подведено электрическое напряжение. Но между электродами — воздух, и потому тока в цепи нет. Если же в это пространство попадет заряженная частица, она создаст на своем пути какое-то количество ионов, и воздух станет проводящим. Такое устройство называется **ионизационной камерой.** Конечно, настоящая ионизационная камера, применяемая в лаборатории для серьезных исследований, выглядит иначе. Ее электроды находятся в разреженном воздухе или газе. Но, по сути дела, она ничем не отличается от шуточной конструкции из ножа и вилки.

Чаще всего для регистрации отдельных частиц применяют так называемый счетчик Гейгера. Это самый распространенный измеритель радиоактивности. Он может зарегистрировать любую заряженную частицу, лишь бы она попала внутрь счетчика и создала там ионы. Напряжение на счетчике Гейгера очень большое. Электроны, возникшие в результате ионизации, разгоняются под действием этого напряжения и срывают на своем пути внешние электроны с атомов электрически нейтральных газов. Они создают грандиозную ионную лавину, которую уже легко измерить обычными приборами. Счетчики Гейгера позволяют вести интереснейшие наблюдения над различными частицами, мчащимися к нам из глубин мирового пространства. Особенно широко эти исследования стали проводиться после запуска искусственных спутников Земли.

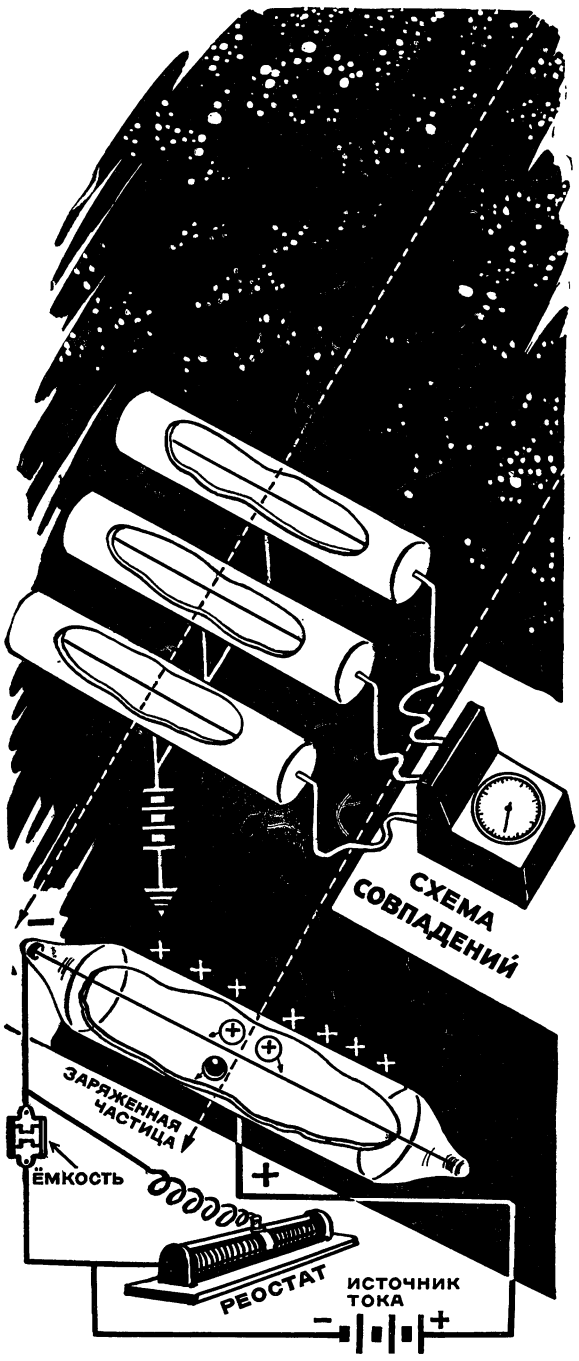
Исключительно важно знать направление полета космических частиц. Чтобы определить его, пользуются сразу несколькими счетчиками — так называемой **схемой совпадений.** Например, в такой схеме соединены три счетчика. Сработает она только в том случае, если частица пролетит через все три счетчика. После этого мы можем сказать, откуда она прилетела, определить ее путь в пространстве.

Чтобы не спутать направление полета одной частицы с полетом нескольких, применяется другая комбинация счетчиков — **схема антисовпадений.** Она регистрирует только те частицы, которые прошли лишь через один счетчик. Сочетая эти две схемы, можно очень точно определить количество различных частиц, бомбардирующих нашу планету, и направление их полета.

## ТУМАН ПОМОГАЕТ ВИДЕТЬ

В воздухе при определенной температуре может содержаться только строго определенное количество водяного пара. Как только температура насыщенного парами воздуха уменьшится, пар начинает конденсироваться в мельчайшие капельки. Особенно легко происходит конденсация на пылинках. Как говорят, пылинки — это центры конденсации, центры образования капелек.

Английский ученый Вильсон, исследуя, как образуется туман, обнаружил интересное явление: при некоторых условиях центрами конденсации могут быть не только пылинки, но и ионы. Сами ионы не видны, их размеры ничтожны, но мельчайшие водяные капли, образовавшиеся вокруг них, становятся видимыми. Ионы образуются на пути заряженной частицы беспрерывно, и в воздухе можно увидеть след, состоящий из тумана — капелек воды. Такой след можно сфотографировать. И это будет уже вполне реальное доказательство, что в простран-




**«Телескоп» для регистрации космических частиц ионизационными счетчиками Гейгера.**

стве камеры произошел какой-то ядерный процесс, что там появилась та или иная частица.

Прибор, в котором можно наблюдать следы летящих и сталкивающихся частиц, называется по имени его изобретателя **камерой Вильсона.** Резерфорд назвал камеру Вильсона «самым оригинальным и изумительным инструментом в истории науки». Другие ученые называют ее «судьей ядерной физики». Много теорий разбилось при проверке опытов этим совершенным аппаратом, и с помощью его сделано много неожиданных открытий. Начиная с опытов Резерфорда, все новое в ядерной физике проверялось камерой Вильсона. Именно в камере Вильсона подтвердилось предположение о существовании нейтрона, в ней открыли позитрон, в ней изучались всевозможные ядерные реакции, с ее помощью были получены снимки следов, оставленных всеми частицами, которые были открыты физиками.

Существует множество самых разнообразных конструкций этого замечательного уст-

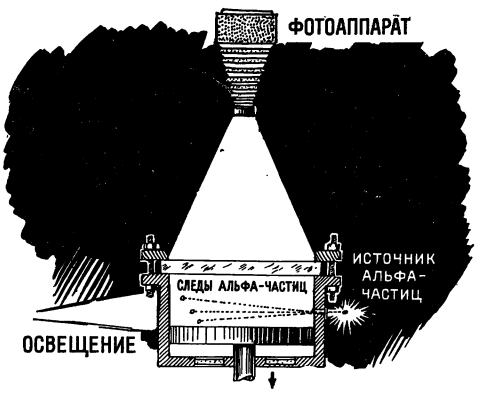



**Схема камеры Вильсона.**

ройства. Принцип действия у всех у них один и тот же. В какой-то момент в камере резко расширяют газ, которым она наполнена, газ из-за этого охлаждается и пары жидкости начинают конденсироваться. Если в этот момент через камеру пролетит какая-нибудь заряженная частица, на ионах в ее следе образуются мельчайшие капли. В момент расширения газов включается фотоаппарат. На снимке получится изображение процессов, происходивших в пространстве камеры в момент съемки. Если в это время через камеру летела частица, то след ее мы увидим на снимке. Для наблюдения над различными ядерными реакциями камеру наполняют соответствующим газом, в котором содержатся ядра, интересующие исследователя, а потом уже на снимках изучают различные взаимодействия с этими ядрами.

Академик Д. В. Скобельцын много работал с камерами Вильсона. Он предложил интерес-

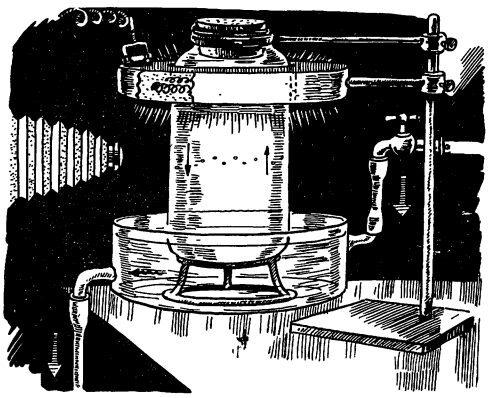
ное усовершенствование, которое теперь носит его имя. По методу Скобельцына, камеру Вильсона вводят в сильное магнитное поле. Следы частиц искривляются. Искривление зависит от величины заряда частицы и его знака. Это устройство позволяет точно определить массу частицы и величину ее заряда.

Обычно камера Вильсона снабжена специальным, очень сложным механизмом, расширяющим газ. Между двумя съемками частиц должен пройти какой-то период «времени восстановления», когда камера как бы «приходит в себя»: в ней восстанавливается нормальное давление газа и исчезают сконденсировавшиеся капельки. Но существует устройство — **диффузионная камера,** которое всегда готово к действию и не нуждается в механизме для расширения газа. Диффузионная камера устроена весьма просто. Основная ее часть — это цилиндр, который сверху подогревают, а снизу охлаждают. Газ, насыщенный водяными парами, идет сверху вниз, примерно в середине камеры пар конденсируется на ионах и следы попадающих в эту зону частиц становятся видимыми.

Самый совершенный прибор — это, конечно, **самоуправляемая камера Вильсона.** Этот прибор сам себя включает. Возле обычной камеры Вильсона расположены по схеме совпадения счетчики Гейгера. Исследователь, проводящий опыт, может сидеть поодаль и ждать, когда камера сработает. Послышится характерный щелчок, и мгновенная вспышка света озарит комнату. В камере произошло расширение газа, зажегся свет сильной лампы и щелкнул фотоаппарат. Все эти приборы включила сама частица, пролетевшая через камеру. Она прошла через оба счетчика (а значит, и через камеру), второй счетчик вместо обычного сигнала включил электрический ток и тем самым привел в действие расширяющий механизм, лампу и фотоаппарат. Так частица фотографирует сама себя. С помощью самоуправляемой камеры Вильсона можно определять виды частиц, их знак, величину их заряда и энергии. Можно наблюдать различные ядерные реакции. В наше время этот замечательный прибор используется во всех лабораториях, где исследуются элементарные частицы.

## ЧАСТИЦА-ФОТОГРАФ

Открытие радиоактивности началось с того, что Анри Беккерель положил кусочек урановой

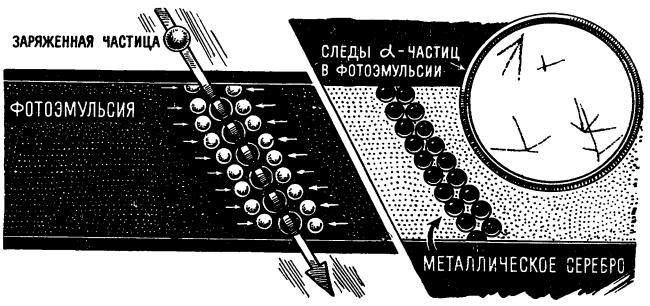


Диффузионная камера.

соли на завернутую в черную бумагу фотопластинку. С тех пор метод регистрации ядерных частиц на фотопластинках стал одним из самых распространенных. Но фотоэмульсия на этих пластинках гораздо толще, чем на применяемых при обычном фотографировании. Когда заряженная частица проходит через пластинку, в ее фотоэмульсии образуются ионы и вокруг них откладывается металлическое серебро. После проявления пластинки виден путь, по которому пролетела частица.

До проявления пластинки след частицы сохраняется внутри эмульсии в скрытом виде. Если через непроявленную пластинку пролетит еще одна частица и даже несколько, их след также будет запечатлен в фотоэмульсии. Таким образом, в фотоэмульсии могут накопиться следы многих частиц и разнообразных ядерных реакций. Когда же пластинка будет проявлена, исследователь сможет судить о заряде и скорости частиц по величине следа.

Чем «жирнее» след частицы, тем большим зарядом она, следовательно, обладала. Траектория высокозаряженной частицы напоминает колос ржи. «Усики», отходящие от сердцевины,




Заряженная частица в эмульсии фотопластинки.

представляют собой следы электронов, которые частица выбивает на своем пути из атомов. Чем извилистее путь частицы, тем меньшей массой она обладает — ведь легкие частицы рассеиваются гораздо сильнее тяжелых.

В последние годы ученые стали применять специальные фотоэмульсионные камеры. В них светочувствительные слои располагаются стопками. Это позволяет еще более детально следить за поведением заряженных частиц.

## СЧЕТЧИКИ ЧЕРЕНКОВА

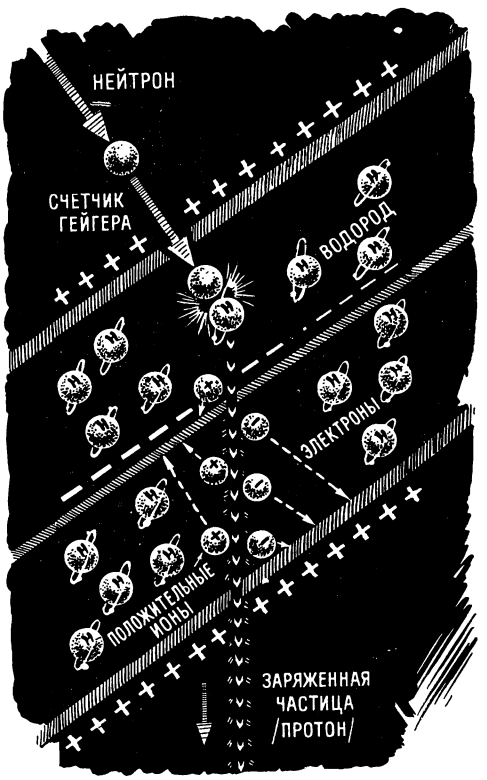
Каждое новое открытие в ядерной физике тотчас же становится поводом для обсуждения: а нельзя ли приспособить его к измерительной технике? Так произошло и с открытием советского физика П. А. Черенкова. Он обнаружил, что частицы, которые проходят через вещество быстрее, чем через это же вещество проходит свет, излучают электромагнитные колебания. Сила такого свечения зависит от скорости частицы, ее заряда и вещества, через которое она пролетает. На основе этого физического явления Черенков сконструировал счетчик, превосходно измеряющий скорость частиц. А это как раз и было в то время самым трудным — правильно определить скорость частицы.

Свечение Черенкова.

**Счетчики Черенкова** применяются теперь для изучения ядерных процессов, которые происходят при больших энергиях частиц. Так, с их помощью была обнаружена новая, весьма интересная элементарная частица — антипротон.

## ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА

В стеклянном сосуде, наполненном жидкостью, давление на одну из стенок может меняться. Если давление понизить очень быстро, жидкость окажется «перегретой»: ее температура станет выше температуры кипения при пониженном давлении. Состояние это неустойчиво, и на ионах, созданных пролетевшей через жидкость микрочастицей, начинают образовываться пузырьки пара. Это явление лежит в основе устройства **пузырьковых камер.** Обычно в пузырьковых камерах применяют сжиженные газы — эфир, пропан и др. Есть камеры, заполняемые жидким водородом или азотом. В таких камерах газ находится под большим давлением: иначе из него и не получишь жидкость.




Регистрация нейтронов.

В устройствах, о которых мы до сих пор рассказывали, регистрируют заряженные частицы. Но ведь в практике часто приходится иметь дело с гамма-излучениями или с нейтронами. Зарегистрировать гамма-лучи совсем просто. В любом счетном устройстве кванты этого излучения выбивают из стенок счетчика электроны, которые можно зарегистрировать обычным для этой камеры способом.

У нейтронов электрического заряда нет. Поэтому, казалось бы, для них непригодны приборы, в которых частицы регистрируются мето-

дом ионизации. Но физики научились регистрировать нейтральные частицы и в обычных камерах. Для этого надо лишь слегка видоизменить камеру.

Нейтроны весьма активно реагируют с некоторыми веществами. Сталкиваясь с легким ядром, например водорода, нейтрон может так сильно ударить по нему, что вытолкнет из атома. Появится заряженная частица, и на ее пути начнется образование ионов. Наполнив водородом счетчик Гейгера, можно регистрировать нейтроны, отмечая следы «освободившихся» ядер водорода — протонов.

Некоторые легкие элементы (бор, литий), захватывая нейтроны, испускают альфа-частицы. Значит, наполнив счетчик газом, содержащим бор, можно зарегистрировать нейтронное излучение.

Если же нужно зарегистрировать не отдельные нейтроны, а их совокупность, например мощность нейтронного потока, поступают еще проще. Атом, захвативший нейтрон, может стать искусственно радиоактивным. На пути потока нейтронов ставят пластинку какого-нибудь вещества, особенно жадно поглощающего нейтроны. Чем больше нейтронов пройдет через эту пластинку, тем более радиоактивным станет ее вещество. Измерив величину наведенной радиоактивности, судят о количестве нейтронов в потоке.

## ИСКРОВЫЕ СЧЕТЧИКИ

Эти приборы, позволяющие видеть невидимое, стали применяться всего лишь лет пятнадцать назад. Искровой счетчик изготовляется в виде герметичных сосудов, наполненных газом. В сосуде параллельно размещаются два плоских электрода, к которым приложено высокое напряжение. Его величина подбирается таким образом, чтобы при прохождении ионизирующих частиц между электродами возникал искровой пробой. Искра проскакивает в том месте, где прошедшая частица создала ионизацию газа.

Искра обладает большой яркостью, и ее легко сфотографировать. Это позволяет точно определять момент прохождения частицы и обрисовать ее траекторию.

■

# ВЕЛИКИЙ ЗАКОН

... Изложенное содержит далеко не все то, что увидели до сих пор через телескоп периодического закона в безграничной области химических эволюций, и тем паче не все то, что можно еще увидеть...

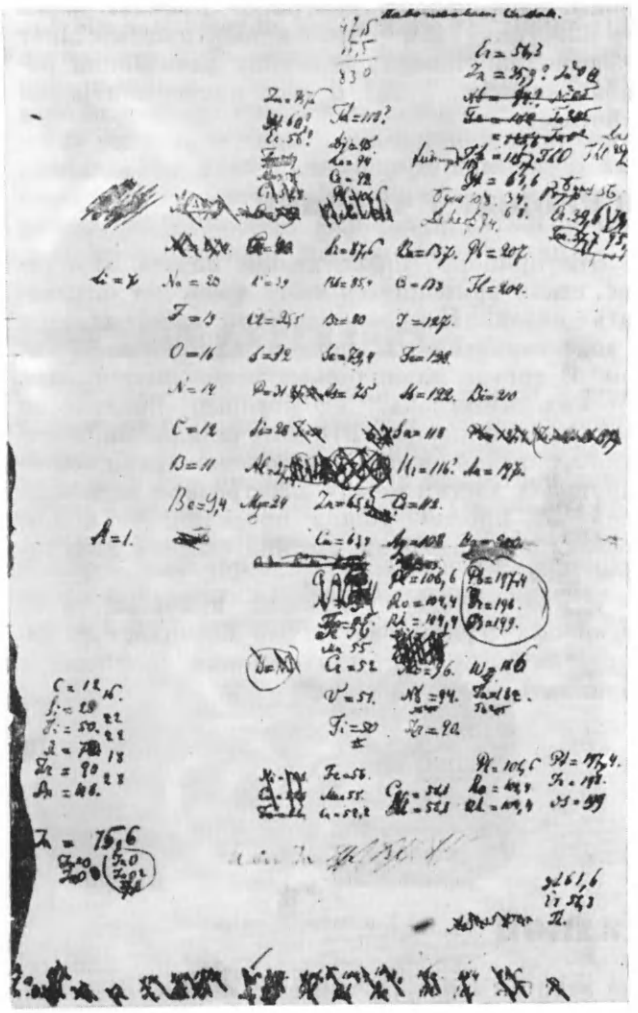
*МЕНДЕЛЕЕВ*

В истории развития человеческих знаний немало великих подвигов. Но только очень немногие из них можно сопоставить с тем, что было сделано Дмитрием Ивановичем Менделеевым — одним из величайших гениев мира. Научный подвиг Менделеева не имеет равных, величие его не только не стирается неумолимым временем, но продолжает расти. И никто не может сказать, будет ли когда-нибудь исчерпано до конца все содержание одного из величайших в науке обобщений — периодического закона Менделеева.

## ОТКРЫТИЕ ВЕЛИКОГО ЗАКОНА

Открытие периодического закона было очень незаметным и скромным.

17 февраля 1869 г., собираясь в дорогу, профессор Петербургского университета Дмитрий Иванович Менделеев на обороте письма, в котором его просили приехать и помочь производству, сделал первый набросок таблицы химических элементов. В этой таблице он расположил элементы в порядке возрастания их атомных ве-



**На этом листке 17 февраля 1869 г. Менделеев набросал свой первый вариант периодического закона. Он еще далеко не похож на привычную форму периодической таблицы элементов из учебника химии.**

сов и проследил периодическую повторяемость их свойств.

Этот день должен быть отмечен в истории науки как начало новой эры: в этот день зародились смелые предсказания о существовании в мироздании никому не известных элементов. Этот день положил начало одной из наиболее могущественных наук — современной химии. К этому дню восходят истоки наших познаний об атоме и его строении, истоки, которые, развиваясь, привели в наши дни человечество к овладению атомной энергией.

В тот день Менделеев отложил свою поездку. Он написал на отдельных карточках **все известные** тогда элементы с их важнейшими химическими и физическими свойствами. Располагая эти карточки в различном порядке, сообразуясь с атомными весами элементов, с их свойствами и со свойствами их соединений, Менделеев составил свой первый вариант естественной системы химических элементов.

Но что же все-таки было сделано Менделеевым в этот исторический для науки день — 17 февраля 1869 г.? На этот вопрос он ответ дал сам. Вот как, по его собственным словам, была им открыта периодическая система:

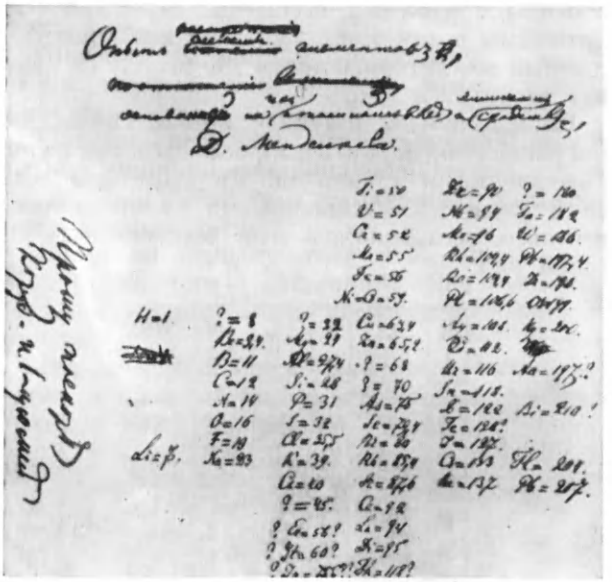
«...Невольно зародилась мысль о том, что между массой и химическими свойствами необходимо должна быть связь. А так как масса вещества, хотя и не абсолютная, а лишь относительная, выражается окончательно в виде весов атомов, то надо искать функциональное соответствие между индивидуальными свойствами элементов и их атомными весами. Искать же что-либо, хотя бы грибы или какую-нибудь зависимость, нельзя иначе, как смотря и пробуя. Вот я и стал подбирать, написав на отдельных карточках элементы с их атомными весами и коренными свойствами, сходные элементы и близкие атомные веса, что быстро и привело к тому заключению, что свойства элементов стоят в периодической зависимости от их атомного веса, причем, сомневаясь во многих неясностях, я ни минуты не сомневался в общности сделанного вывода, так как случайность допустить было невозможно».

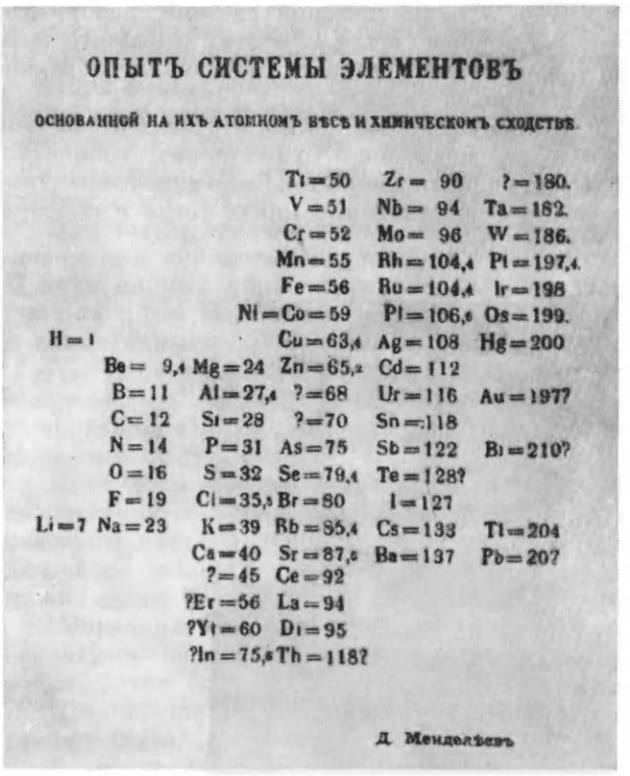
С этого дня Дмитрий Иванович отбросил все свои занятия. Он с огромным напряжением отдался только работе над периодическим законом.

1 марта 1869 г. Менделеев разослал многим русским и заграничным ученым небольшой листок, содержавший первый вариант периодической системы — «Опыт системы элементов», а несколькими днями позже передал своему другу проф. Н. А. Меншуткину доклад под названием «Соотношение свойств с атомным весом элементов».

Менее двух недель продолжалась поистине титаническая работа Менделеева над созданием основного закона современной химии. За этот короткий период он сумел пройти весь путь от первого проблеска, от первой догадки о существовании нового неизвестного закона природы до его четкой формулировки, до его исчерпывающего доказательства и величайших в истории науки предсказаний.

Завершив первый этап работы над периодическим законом, Менделеев вернулся к отложенному делу, связанному с помощью промыш-





ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ti=50 | Zr= 90 | ?=180. | |
| | | | V=51 | Nb= 94 | Ta=182. | |
| | | | Cr=52 | Mo= 96 | W=186. | |
| | | | Mn=55 | Rh=104,4 | Pt=197,4. | |
| | | | Fe=56 | Ru=104,4 | Ir=198 | |
| | | | Ni=Co=59 | Pl=106,6 | Os=199. | |
| H=1 | | | Cu=63,4 | Ag=108 | Hg=200 | |
| | Be= 9,4 | Mg=24 | Zn=65,2 | Cd=112 | | |
| | B=11 | Al=27,4 | ?=68 | Ur=116 | Au=197? | |
| | C=12 | Si=28 | ?=70 | Sn=118 | | |
| | N=14 | P=31 | As=75 | Sb=122 | Bi=210? | |
| | O=16 | S=32 | Se=79,4 | Te=128? | | |
| | F=19 | Cl=35,5 | Br=80 | I=127 | | |
| Li=7 | Na=23 | K=39 | Rb=85,4 | Cs=133 | Tl=204 | |
| | | Ca=40 | Sr=87,6 | Ba=137 | Pb=207 | |
| | | ?=45 | Ce=92 | | | |
| | | ?Er=56 | La=94 | | | |
| | | ?Yt=60 | Di=95 | | | |
| | | ?In=75,6 | Th=118? | | | |

Д. Менделѣевъ

**«Первые мысли о периодичности,— писал Д. И. Менделеев,— вложены мною в листок... который 1-го марта 1869 г. был послан мною многим ученым». Это самая первая таблица периодической системы элементов. Она далеко еще не закончена. У нее необычная и неудобная форма. В ней еще можно заметить много неточностей. Но самое главное в этом листочке — его историческое значение. Это он впервые возвестил миру о наступлении новой эры в науке. Это он положил начало разгадке тайны строения атома. Замечательно то, что уже в этой самой первой таблице оставлены и отмечены знаком вопроса п у с т ы е места. Рядом приведена рукопись Менделеева, с которой и был сделан типографский набор этой первой в мире периодической таблицы.**

ленному производству, и уехал из Петербурга в командировку.

Первое сообщение о величайшем открытии было сделано 6 марта 1869 г. на заседании Русского химического общества. Менделеева на этом заседании не было. Вместо отсутствовавшего автора его доклад прочел Меншуткин. В протоколах Русского химического общества появилась сухая запись о собрании 6 марта 1869 г.: «Н. Меншуткин сообщает от имени Д. Менделеева опыт системы элементов, основанный на их атомном весе и химическом сходстве. За отсутствием Д. Менделеева обсуждение этого сообщения отложено до следующего заседания».

Этот сухой канцелярский протокол стал историческим документом огромной важности — свидетельством о первом знакомстве человечества с новым законом природы, с открытием, которое перевернуло впоследствии весь ход развития научной мысли.

Но нужно признать, что ученые, современники Менделеева, впервые услышавшие и узнавшие об этой периодической системе элементов, не смогли ее сразу понять. Они не обратили на нее внимания и остались к ней равнодушными.

## КАК БЫЛ ОТКРЫТ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН

А было ли все так просто, как рассказывал сам Менделеев? На первый взгляд и в самом деле нет ничего трудного в том, чтобы, написав на отдельных карточках названия элементов, их атомные веса и свойства, расположить их по порядку.

Ведь из всех способов, какими можно было бы комбинировать эти карточки, наиболее простой — расположить их в ряд по возрастанию атомного веса начиная с элемента с наименьшим весом.

Это, конечно, первое, что должно прийти в голову каждому. Подметить же закономерность в изменении свойств правильно расположенных элементов не так уж должно быть трудно. Ведь эти свойства во времена Менделеева были хорошо известны.

В чем же заслуга Менделеева? Давайте условимся на некоторое время забыть все, что нам уже известно о химии, все, что мы успели узнать

в школе о периодической системе, вообразим, что мы перенеслись в середину прошлого века и можем знать только то, что знали современники Менделеева.

К этому времени было открыто и изучено примерно шестьдесят химических элементов. Свыше тридцати элементов были еще неизвестны, и об их существовании никто тогда и подозревать не мог.

**Эта фотография была сделана в том же году, в котором великий ученый заложил основы периодического закона. Одно из величайших открытий в науке было сделано еще совсем молодым ученым. В 1869 г. Д. И. Менделееву исполнилось всего лишь 35 лет.**

Уже были найдены способы определения атомного веса, но измеряли его еще грубо, с малой точностью, и далеко не для всех элементов правильно. Для химиков времен Менделеева это была еще очень трудная задача. Неверно были определены атомные веса у многих элементов, причем, конечно, об этом тогда тоже никто не подозревал.

Значит, из примерно девяти десятков элементов, существующих в природе, химики более или менее хорошо изучили только около пятидесяти элементов.

Как же должен был бы расположить свои карточки Менделеев? Самый малый атомный вес у водорода (H), он равен 1. Следующим по порядку был в то время литий (Li). Его атомный вес около 7. За ним шел бор (B) с атомным весом около 11. Далее углерод (C) с атомным весом 12, азот (N) с атомным весом 14, бериллий (Be) с атомным весом тоже 14, затем кислород (O), атомный вес которого равен 16, фтор (F) с атомным весом 19 и т. д.

Следовательно, в 1869 г. любой химик, желая расположить карточки с написанными на них обозначениями элементов, их атомными весами и химическими свойствами по **возрастанию атомного веса,** должен был бы составить вот какой ряд:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| H 1 | Li 7 | B 11 | C 12 | N 14 | Be 14 |
| O 16 | F 19 | Na 23 | Mg 24 | Al 27 | Si 28 |
| P 31 | S 32 | Cl 35 | | | |

На этих карточках написаны округленные атомные веса с той точностью, с какой они были известны химикам в 1869 г.

А как расположил Менделеев свои карточки с элементами?

Конечно, на **первой** карточке у Менделеева также были написаны: название, атомный вес и свойства водорода.

**Вторую** карточку с атомным весом и свойствами металла лития он поместил **под** карточкой водорода. На **третье** место рядом с литием Менделеев положил карточку, на которой было им написано:

Be 9

хотя в те времена большинство химиков было твердо уверено, в соответствии со всеми данными химии бериллия, что на этой карточке должно было быть помечено:

Be 14

Почему же Менделеев, не проводя сам никаких новых исследований, не определяя атомный вес элемента бериллия, не изучая его химические свойства, осмелился исправлять атомный вес — важнейшую и, казалось бы, уже твердо установленную характеристику химического элемента? Ведь он сам никогда не занимался научными исследованиями в области химии бериллия.

На **четвертое** место Менделеев поместил карточку бора.

**Пятое** место занял у него углерод.

На **шестом** месте — азот, далее следовали кислород и фтор.

**Девятая** карточка, принадлежащая металлу натрию, была им помещена **под второй,** на которой были записаны химические характеристики металла лития.

Затем по порядку следующее место занял магний, за ним — алюминий. Под углеродом оказался кремний, под кислородом — сера, под фтором — хлор.

Вот как Менделеев расположил свои карточки с названиями и свойствами элементов в начале своей таблицы:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H 1 | | | | | | |
| Li 7 | Be 9 | B 11 | C 12 | N 14 | O 16 | F 19 |
| Na 23 | Mg 24 | Al 27 | Si 28 | P 31 | S 32 | Cl 35 |

Итак, в вертикальных рядах оказались химически сходные элементы. Металл литий похож на металл натрий: оба мягкие, легко режутся ножом, бурно реагируют с водой, образуя щелочи. Бериллий и магний схожи друг с другом. У фтора много общего с хлором — это едкие удушливые газы, которые образуют с металлами совершенно сходные соединения. И каждый химик знает, что свойства кислорода и серы сходны между собой.

При таком расположении совершенно четко проявилась периодичность свойств у элементов. В двух первых коротких периодах менделеевской таблицы правильно чередуются элементы с аналогичными свойствами.

Как же все-таки эти периоды были построены Менделеевым? Пожалуй, он был неправ, когда утверждал, что расположил элементы по их атомному весу.

Если бы он действительно расположил их по возрастанию тех атомных весов, которые были **известны** науке в то время, то никакого периодического закона обнаружить было бы невозможно даже в первых рядах таблицы.

Скорее наоборот, Менделеев установил на основании периодического закона правильный атомный вес бериллия.

Позднейшие исследования подтвердили это предсказание.

Если исходить из атомных весов, известных в середине прошлого века, то следующие два

## Предшественники Менделеева

Великое открытие в науке, конечно, никогда не бывает внезапным. И до Менделеева многие химики пытались отыскать общие закономерности и сходство в свойствах химических элементов. Например, немецкий ученый И. Дёберейнер еще в 1829 г. установил, что элементы со сходными химическими свойствами могут быть сгруппированы по три: скажем, литий, натрий и калий или хлор, бром и йод. Такие группы Дёберейнер назвал триадами.

В 1849 г. систематикой элементов заинтересовался русский химик Г. И. Гесс. В своем учебнике «Основания чистой химии» он рассматривал четыре группы элементов-неметаллов, имеющих сходные химические свойства:

| | | | |
|---|---|---|---|
| йод | теллур | углерод | азот |
| бром | селен | бор | фосфор |
| хлор | сера | кремний | мышьяк |
| фтор | кислород | | |

Гесс писал: «Эта классификация еще очень далека от того, чтобы быть естественной, но она все-таки соединяет элементы в группы весьма сходные, и с расширением наших сведений она может усовершенствоваться».

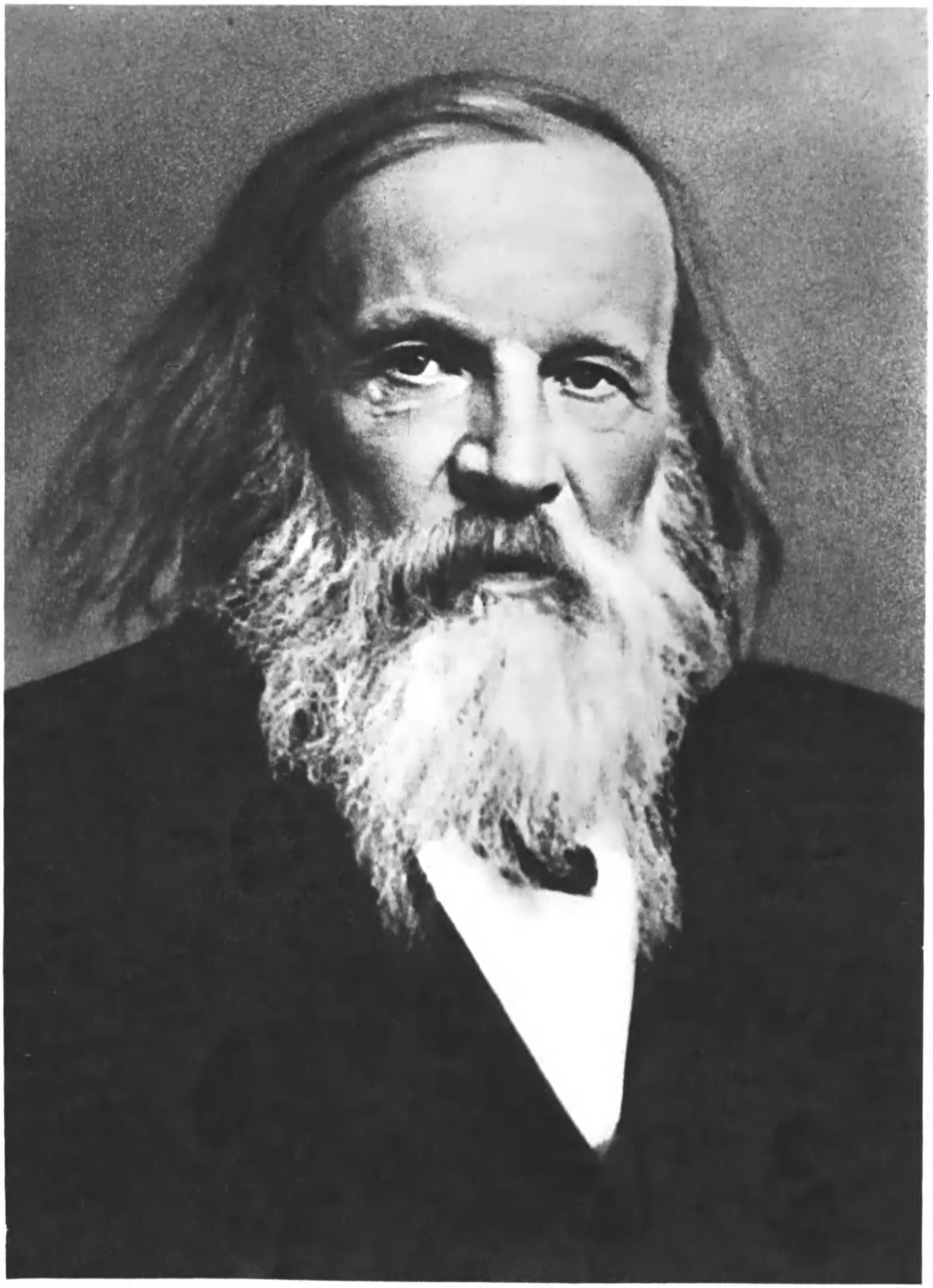
Следующий шаг сделал французский химик Б. де-Шанкуртуа. Систему элементов он представлял себе в виде спиральной линии на поверхности цилиндра. На каждом витке — по 16 элементов. Сходные элементы располагались друг под другом на образующей цилиндра. Но никто из ученых и не обратил внимания на работу де-Шанкуртуа.

Английский химик Дж. Ньюлендс в 1866 г. предложил так называемый «закон октав». Он считал, что все в мире подчиняется общей гармонии. И в химии, и в музыке она должна быть единой. Поэтому свойства химических элементов, расположенных по возрастанию атомного веса, должны повторяться через каждые семь элементов, так как в музыкальной гамме сходные ноты чередуются в октаве через каждые семь нот. По «закону октав», однако, оказывались «сходными» такие совершенно различные элементы, как углерод и ртуть. Когда Ньюлендс доложил свою работу на заседании Лондонского химического общества, один из присутствующих не без сарказма спросил, не пробовал ли уважаемый докладчик расположить элементы в алфавитном порядке и не обнаружил ли он и при этом какую-нибудь закономерность.

Ближе других к истине оказался, пожалуй, немецкий химик Л. Мейер. В 1864 г. он предложил таблицу, в которой все известные химические элементы были разбиты на шесть групп, согласно их валентности.

Но никто из этих славных химиков, много сделавших для подготовки периодического закона, и не подозревал, что в их знаниях о природе элементов есть «пустые места», открыть Великий закон они не могли. Это оказалось под силу только гению Менделеева.

МИХАИЛ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛОМОНОСОВ



ДМИТРИЙ ИВАНОВИЧ МЕНДЕЛЕЕВ

горизонтальных ряда элементов, идущих за хлором, надо было бы построить так:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K 39 | Ca 40 | V 51 | Cr 52 | Ti 52 | Mn 55 | Fe 56 | Co 59 |
| Ni 59 | Cu 63 | Zn 65 | As 75 | Se 78 | Br 80 | | |

## ТАЙНА ПУСТОГО МЕСТА

Но, продолжая построение своей таблицы, Менделеев разместил карточки с элементами совсем не так.

Под карточкой натрия была помещена карточка с очень похожим на натрий калием; и калий стал началом нового ряда. Под магнием тогда оказался также очень сходный с ним кальций.

Следующим, в порядке возрастания атомного веса, должен был бы идти **ванадий**, но его карточка пока отложена в сторону, а вместо нее рядом с кальцием Менделеев кладет **пустую**(!) карточку. С точки зрения химика прошлого столетия, это— удивительный, непонятный и ничем не оправданный поступок.

Вслед за пустой карточкой можно было ждать, что будет положена карточка ванадия. Но вместо ванадия на следующем месте оказывается **титан**, у которого Менделеев осмеливается, не проводя сам никаких исследований, вопреки всему, что известно о титане всем химикам во всем мире, изменить произвольно его атомный вес с 52 на 48 (!). После чего, наконец, за титаном следует карточка **ванадия,** и только за ней идут карточки **хрома** и **марганца.**

Как же все-таки располагал свои карточки Менделеев? Ведь и в этом ряду таблицы он разместил элементы **вопреки** возрастанию известных в то время атомных весов. Прежде чем поместить карточку титана в таблицу, Менделеев, по существу, предсказал истинное значение его атомного веса так же, как это он сделал для бериллия.

Этот период в таблице Менделеева длинный. За марганцем идут железо (Fe) — 56, кобальт (Co) — 59, никель (Ni) — 59, далее медь (Cu)— 63, цинк (Zn) — 65. Но вслед за цинком ученый снова оставил в своей таблице подряд **два пустых места.**

Далее следовали карточки с хорошо известными элементами — мышьяком, селеном и карточка с бромом, завершающая длинный период. При этом карточки мышьяка, селена и брома оказались лежащими под **сходными** с ними элементами конца предыдущего короткого периода: фосфором, серой и хлором.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H 1 | | | | | | |
| Li 7 | Be 9 | B 11 | C 12 | N 14 | O 16 | F 19 |
| Na 23 | Mg 24 | Al 27 | Si 28 | P 31 | S 32 | Cl 35 |
| K 39 | Ca 40 | ? | Ti 48 | V 51 | Cr 52 | Mn 55 | Fe 56 | Co 59 | Ni 59 |
| Cu 63 | Zn 65 | ? | ? | As 75 | Se 78 | Br 80 | | | |

Из того, что мы разобрали, совершенно очевидно, что все обстояло далеко не так просто, как скромно рассказывал сам Менделеев.

Одних только фактов, которые были известны химикам до Менделеева, как бы их ни комбинировать, не было достаточно чтобы открыть один из величайших законов природы — периодический закон. Нужно было не только знать накопленный в течение многих веков химический опыт. Надо было обладать гениальностью и особенно тонкой интуицией, чтобы охватить всю необозримую совокупность бесчисленного множества химических явлений и глубоко почувствовать скрытую в них закономерность.

Нужно было обладать особой революционной смелостью, чтобы, осознав эту закономерность, исправлять старое и предсказывать новое в науке.

## ВЕЛИКОЕ ПРЕДСКАЗАНИЕ

Что же означают пустые места в таблице Менделеева? Может быть, это пробелы в природе и потому химики не нашли элементы, подходящие к пустым клеткам таблицы? Или это пробелы в человеческом знании о природе? Существует ли, например, в природе элемент, атомный вес которого больше, чем у кальция, и меньше, чем у титана, и в то же время похожий химическими свойствами на бор и алюминий?

У Менделеева сомнений не было. Каждое место в таблице соответствует определенному химическому элементу, который должен обязательно существовать.

Места, на которых были расположены карточки с названиями элементов, клетки в периодической таблице, где вписаны символы элементов и их атомные веса, для великого ученого были полны глубочайшим содержанием; они определяли всю природу каждого элемента, все его физические и химические свойства и свойства всех его соединений.

В 1871 г. в журнале Русского химического общества появилась большая работа Менделеева. Она называлась «Естественная система элементов и применение ее к указанию свойств неоткрытых элементов». Вряд ли в мировой научной литературе когда-либо была опубликована статья, похожая на эту! В ней Менделеев описал три никем, никогда и нигде в мире не виданных химических элемента, причем описал их так обстоятельно, как не смог бы это сделать иной ученый-исследователь, державший в руках их соединения и посвятивший долгие годы опытному изучению их в лаборатории.

Во всей истории науки трудно найти что-либо равное этому необычайному выступлению русского химика — не только по научной смелости, не только по революционной глубине высказанных в нем мыслей, но и по огромному влиянию этой статьи на развитие не только химии, но и всей науки в течение почти столетия вплоть до наших дней.

«Решаюсь сделать это ради того, чтобы хотя со временем, когда будет открыто одно из этих предсказываемых мною тел, иметь возможность окончательно увериться самому и уверить других химиков в справедливости тех предположений, которые лежат в основании предлагаемой мною системы»,— писал в этой статье Менделеев.

Каким же путем периодический закон дает возможность описывать неведомое? Каким образом место в таблице определяет свойства элемента? Лучше всего это можно понять, если попытаться, по примеру Менделеева, сравнить свойства элемента пустой клетки со свойствами его соседей. Выделим из таблицы ту часть, которая включает пустые места и окружающие их элементы.

Пустая клетка между кальцием и титаном находится в начале четвертого периода, а две пустые клетки, расположенные рядом между цинком (Zn) и мышьяком (As), находятся в конце этого периода.

Гипотетический (предполагаемый) элемент, который должен был занимать первое пустое место, Менделеев назвал **экабором**. В таблице он следует за кальцием. Тот элемент, который должен занять пустое место около цинка, Менделеев назвал **экаалюминием**, а соседний с ним — **экасилицием**.

| | II | III | IV | V |
|---|---|---|---|---|
| 2 | Be 9 | B 11 | C 12 | N 14 |
| 3 | Mg 24 | Al 27 | Si 28 | P 31 |
| 4 | Ca 40 | ? | Ti 48 | V 51 |
| | Zn 65 | ? | ? | As 75 |
| 5 | Sr 88 | Y 89 | Zr 91 | Nb 94 |
| | Cd 112 | In 114 | Sn 119 | Sb 120 |

Пустое место экабора находится между кальцием (атомный вес 40) и титаном (атомный вес 48). Следовательно, атомный вес экабора должен быть близок к среднему значению:

$$\frac{40+48}{2}=44.$$

С кислородом он должен давать окись, аналогичную по составу с окисями бора и алюминия: $X_2O_3$. Сам экабор должен быть легким металлом: он ведь стоит между двумя легкими металлами— кальцием и титаном. Плотность соседей экабора по ряду позволяет определить и его плотность. Для кальция она равна 1,6, для титана — 5,2. Поэтому плотность экабора должна быть приблизительно равна:

$$\frac{1,6+5,2}{2}=3,4.$$

У экабора должны быть бесцветные соли, потому что соседи образуют бесцветные соединения.

Из растворов его солей экабор можно осаждать содой, его углекислая соль будет нерастворимой, потому что его соседи образуют нерастворимые углекислые соли.

Попробуем описать и еще один элемент, пустое место которого находится рядом с цинком,— экаалюминий.

Между цинком и мышьяком Менделеев оставил два пустых места. Атомный вес мышьяка —

75, цинка — 65. Нетрудно сообразить, что экаалюминий должен обладать атомным весом около 68. Он помещается в третьем столбце рядом с металлом цинком; в этом столбце находится алюминий — тоже металл, и экаалюминий должен быть на него похожим. Значит, экаалюминий будет тоже металлом.

Плотность его мы определили бы по известной плотности ближайших соседей, учитывая лишь, что рядом с экаалюминием есть еще одно пустое место — экасилиций. Плотность экаалюминия должна быть близка к 6,0. Так же, как и экабор, экаалюминий можно осадить содой из растворов его солей.

Соединения алюминия с хлором обладают при высокой температуре летучестью, и хлористое соединение экаалюминия должно быть также летучим.

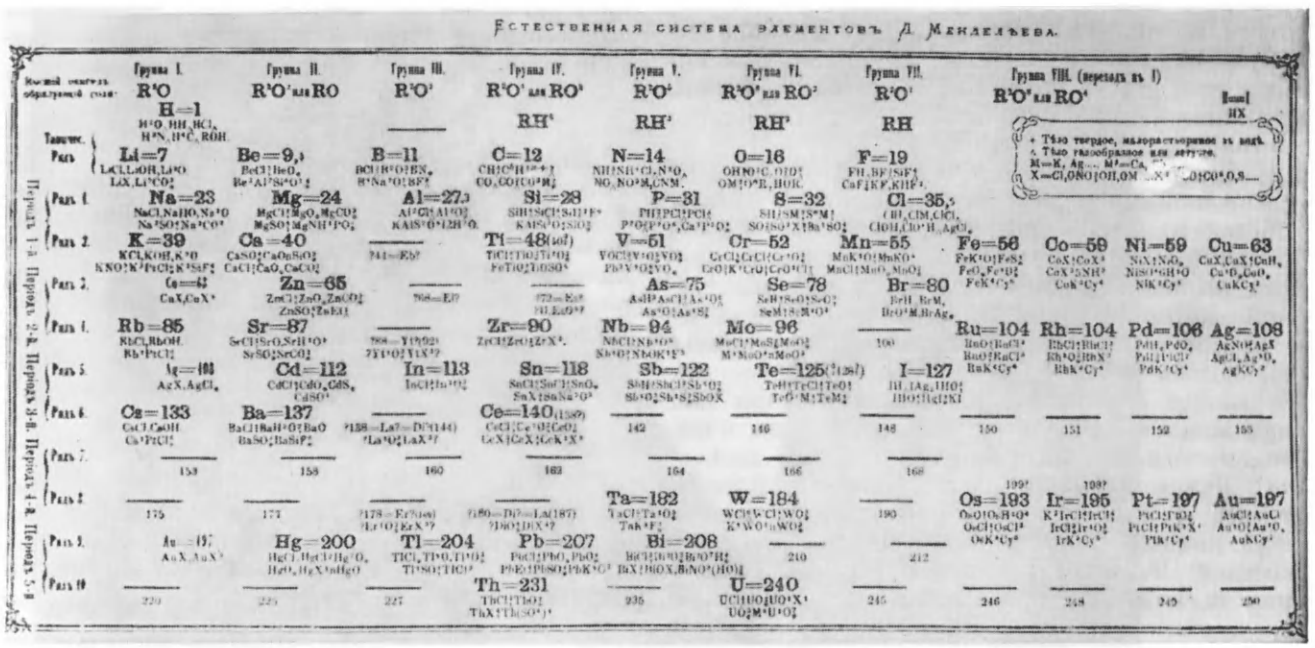
Вот какими словами Менделеев заканчивает описание свойств экаалюминия: «Можно надеяться, что он будет открыт спектральным исследованием, подобно тому как открыты следующие за ним индий и таллий...»

Таким образом, Д. И. Менделеев не только описал неведомое, но и предсказал, как оно будет познано.

## КАК ОПРАВДАЛИСЬ ПРЕДСКАЗАНИЯ МЕНДЕЛЕЕВА

Не прошло и шести лет, как весь мир облетело известие: в 1875 г. молодой французский ученый-спектроскопист Лекок де Буабодран выделил из минерала, добытого в Пиренейских горах, новый элемент. Буабодрана навела на след слабая фиолетовая линия в спектре минерала, которую нельзя было приписать ни одному из известных химических элементов. В честь своей родины, которая в древности называлась Галлией, Буабодран назвал новый элемент галлием. Галлий—очень редкий металл, и Буабодрану стоило большого труда добыть его в количестве немногим больше булавочной головки. Но Буабодран оказался большим искусником. Он ухитрился с этой крупинкой проделать много интересных опытов и подробно описал новый металл: удельный вес галлия, температуру плавления, соединение с кислородом и даже соли.

Каково же было удивление Буабодрана, когда через Парижскую академию наук он получил письмо с русской маркой, в котором сообщалось: в описании свойств галлия все верно за исключе-




**Эта таблица была помещена Д. И. Менделеевым в одном из первых изданий его учебника «Основы химии» (1871). В ней еще очень много пустых мест. Еще не открыты галлий, скандий и германий, и их места занимают пока еще не оправдавшие предсказания об их существовании: экаалюминий, экабор и экасилиций. Совершенно отсутствует нулевая группа, о существовании в природе благородных газов пока еще никто в мире не подозревал. Особенно интересно, что Менделеев в этой таблице предусмотрел пять свободных мест за ураном.**

нием удельного веса: галлий тяжелее воды не в 4,7 раза, как утверждал Буабодран, а в 5,9 раза.

Неужели кто-то другой открыл галлий раньше? Озадаченный Буабодран заново определил удельный вес галлия, подвергнув металл более тщательной очистке. И оказалось, что он ошибся, а автор письма — это был, конечно, Менделеев, который никогда и не видел галлия,— прав: удельный вес галлия равен не 4,7, а 5,9.

Еще через 4 года, в 1879 г., скандинавский химик Нильсон нашел новый неизвестный элемент в редком минерале гадолините. Его назвали скандием. Когда же были изучены его свойства, стало совершенно очевидно, что это не что иное, как давно известный, по предсказаниям Менделеева, экабор.

А через 15 лет после предсказания Менделеева (в 1886 г.) немецкий химик Винклер открыл новый элемент и назвал его германием.

На этот раз Менделееву не пришлось самому указывать, что и этот вновь открытый элемент был им предсказан ранее. В своем сообщении Винклер отметил, что его германий полностью соответствует экасилицию Менделеева.

Он писал в своей работе: «Едва ли можно найти иное более поразительное доказательство справедливости учения о периодичности, как во вновь открытом элементе. Это не просто подтверждение смелой теории, здесь мы видим очевидное расширение химического кругозора, мощный шаг в области познания».

Винклер не искал германий по приметам, опубликованным Менделеевым. Он наткнулся на него случайно. Получилось так, что еще неоткрытые химические элементы как бы взяты на учет: их столько, сколько пустующих клеток в периодической таблице Менделеева. Приметы каждого из них в точности известны, и даже можно предсказать заранее, в каких минералах нужно их искать, какими химическими способами следует извлекать эти элементы из минералов, в которых они скрываются.

Величие научного открытия определяется в первую очередь тем, что оно позволяет предвидеть новое, еще неизвестное, неоткрытое. И лучшим испытанием нового закона будет осуществление сделанных на его основе предсказаний.

Существование в природе более десяти новых, не известных никому элементов предсказал сам Менделеев. Для десятка элементов он предсказал правильные атомные веса. Все последующие поиски новых элементов в природе велись исследователями при помощи периодического закона. Этот закон не только помогал ученым в поисках истины, но и способствовал исправлению ошибок и заблуждений в науке.

В 1864 г. был «открыт» элемент «ильмений». Для него был установлен атомный вес 114. По некоторым свойствам он был похож на марганец. Казалось, что его следует поместить в свободную клетку таблицы, где должен был находиться предсказанный Менделеевым экамарганец. Но Менделеев отказался это сделать. Он заявил, что «ильмений» своими свойствами не соответствует требованиям периодического закона и что такой элемент существовать в природе не может. «Открытие» «ильмения» просто ошибка. Менделеев был прав. Вскоре было доказано, что такого элемента в природе нет.

## ВЕЛИКОЕ ИСПЫТАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗАКОНА

26 октября 1868 г. на заседании Парижской академии наук были прочитаны одно за другим два письма. Одно было прислано из Индии, от астронома Жансена, другое — из Англии, от астронома Локьера. Оба сообщали, что в спектре солнечных протуберанцев они (независимо друг от друга) обнаружили новую желтую линию, которая не может принадлежать ни одному химическому элементу из существующих на земном шаре. Было решено, что новая линия в спектре принадлежит какому-то особому, «небесному», элементу. Он был назван древнегреческим именем Солнца — гелий.

Спустя 25 лет после открытия гелия на Солнце знаменитый английский физик Релей обнаружил очень странный факт: литр чистого азота, добытого из воздуха, тяжелее, чем литр того же азота, полученного из любого азотного соединения. Разница была ничтожна — тысячные доли грамма, но она была.

Релей написал об этом письмо в лондонский журнал «Природа». Он спрашивал, не сумеет ли кто-нибудь из читателей журнала объяснить, почему «воздушный» азот тяжелее. Но ответов не последовало. Тогда Релей обратился к своему другу — известному химику Рамзаю, и они решили, что каждый из них не покинет свою лабораторию, пока загадка не будет разгадана. Они работали разными методами и, наконец, нашли, что в обычном воздухе существует какая-то примесь, и не малая: в каждом литре воздуха содержится около 10 $см^3$ еще неизвестного газа. Они дали ему имя «аргон». Странный это был газ. Подоб-

ных веществ химики еще не знали. Никакими средствами им не удавалось заставить его вступать в химические реакции. Это и было выражено в его названии: по-гречески «аргон» — значит «ленивый».

Аргон оказался новым химическим элементом. Затем Рамзай узнал, что известный химик Гильдебрант наблюдал некоторые минералы (они содержали уран или торий), которые при нагревании выделяют какой-то негорючий газ. Рамзай решил проверить, не аргон ли это.

Но газ, выделившийся из минерала клевеита, оказался не аргоном. У него был совершенно другой спектр, отличный от уже изученного спектра аргона. Рамзай дал ему имя «криптон» («тайный») и послал запаянную пробирку с «криптоном» одному из опытных спектроскопистов, Круксу, для точного исследования спектра. В ответ он получил телеграмму: «Криптон — это гелий. Приходите и поглядите. Крукс».

Так газ, впервые за четверть века до этого найденный на Солнце, был, наконец, обнаружен на Земле. Гелий оказался самым легким газом после водорода.

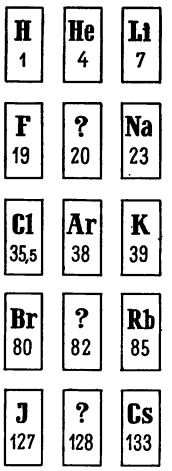
Но периодический закон не предусматривал существование таких химических элементов, как гелий и аргон. Для них в периодической системе не было пустых клеток. Куда же поместить новые элементы? Скептики снова воспрянули духом, снова зазвучали голоса сомневающихся в периодической системе и периодическом законе. Но это продолжалось недолго.

В 1897 г. Рамзай прочел доклад, который он озаглавил так: «Еще не открытый газ». Рамзай сказал: «По образцу нашего учителя Менделеева я описал, поскольку возможно было, ожидаемые и предполагаемые соотношения газообразного элемента, который должен был бы заполнить пробел между гелием и аргоном».

Места для гелия и аргона в таблице нашел Рамзай. Они были помещены в новый, нулевой, столбец между седьмым, где были фтор и хлор, и первым, где разместились металлы, подобные литию и калию. Отсюда следовало, что должен существовать газ, столь же инертный, как аргон, но легче его — с атомным весом 20.

Руководствуясь предсказанными свойствами, Рамзай предпринял поиски нового газа и нашел его в сжиженном воздухе. Этот газ получил название «неон», что значит «новый», а вскоре были найдены и остальные элементы новой группы: криптон, ксенон и затем радон.

Из нового испытания периодический закон вышел с победой. Иначе и не могло быть! После этого ни у кого в мире не оставалось сомнения в истинности периодического закона Менделеева.




**Так были предсказаны Рамзаем на основании периодического закона благородные газы. По существу, это было сделано совершенно так же, как Менделеев предсказал галлий, германий и скандий. Все пустые места вскоре заняли вновь открытые элементы: неон, криптон и ксенон. Атомные веса на карточках приближенные.**

Этот успех был заслуженным. Великий закон доказал единство вещества во Вселенной. Он внес стройность и порядок в невообразимую путаницу бесчисленного множества фактов, наблюдений, измерений, накопленных химией к середине прошлого века за сотни лет. Он дал могучий метод для изучения химических элементов и их свойств. Сам Менделеев исправил атомные веса многих элементов, известных ранее, в том числе, например, урана. Периодический закон дал возможность предсказывать новое — это истинный закон природы.

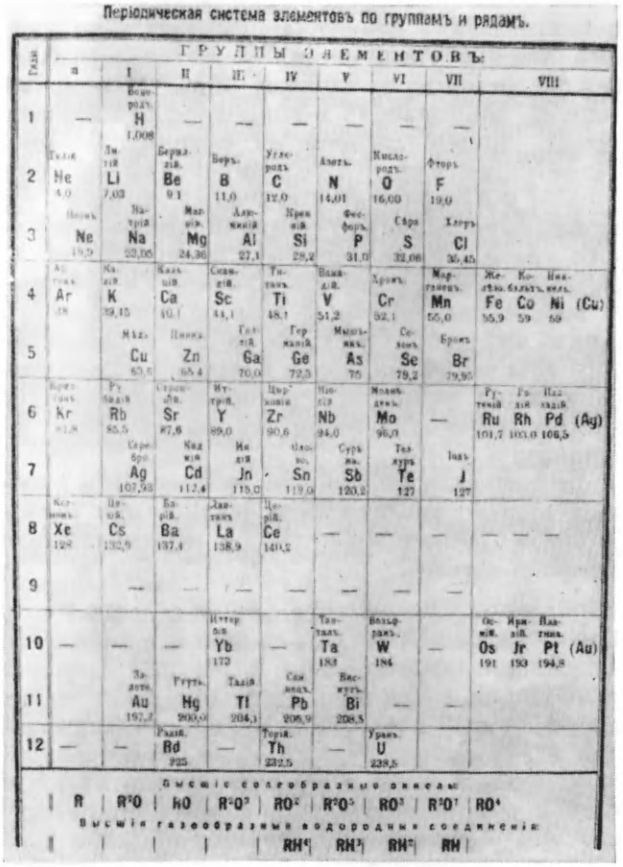
Но не все было ясно в периодическом законе. Были необъяснимые исключения: атомный вес аргона (39,9) оказался большим, чем атомный вес калия (39,1), а аргон в таблице стоит **перед** калием. Атомный вес кобальта превышал атомный вес никеля, хотя по свойствам кобальт в периодической системе должен был **предшествовать** никелю. И у теллура, стоящего **перед** йодом, атомный вес оказался больше, чем у йода. Не только это было неясным в таблице. Было твердо установлено, сколько должно быть элементов в первых периодах таблицы, но оставалось совершенно неясным, сколько элементов должно быть в ее последних периодах.

Самое же главное, что было неясным,— это сам периодический закон. Он требовал от науки решить величайшую, казалось, неразрешимую задачу: объяснить периодичность химических свойств у элементов, из которых состоит весь окружающий нас мир.

## КАК РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НАШЛИ СВОИ МЕСТА В ТАБЛИЦЕ МЕНДЕЛЕЕВА

Развитие науки поставило периодический закон перед новым, еще более суровым испытанием, чем те, из которых он уже с честью вышел.

Это было в конце прошлого — начале нашего века. Во Франции два скромных ученых — супруги Пьер и Мария Кюри — заинтересовались странным явлением, которое открыл другой ученый — Беккерель. Они решили выяснить, почему минералы и руды, содержащие уран, испускают загадочные невидимые лучи, способные проникать через непрозрачные тела и действовать на фотографическую пластинку. Очень скоро они обнаружили, что в природе существуют такие минералы, в которых урана мало, а на пластинку эти минералы действуют гораздо сильнее, чем чистый уран. Супруги Кюри предприняли кропотливые, занявшие долгие годы их жизни поиски новых неведомых элементов — носителей радиоактивного излучения (см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов»).


Періодическая система элементовъ по группамъ и рядамъ.

ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ

| Ряд | 0 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | — | Водород H 1,008 | — | — | — | — | — | — | |
| 2 | Гелій He 4,0 | Литій Li 7,03 | Бериллій Be 9,1 | Боръ B 11,0 | Углеродъ C 12,0 | Азотъ N 14,01 | Кислородъ O 16,00 | Фторъ F 19,0 | |
| 3 | Неонъ Ne 19,9 | Натрій Na 23,05 | Магній Mg 24,36 | Алюминій Al 27,1 | Кремній Si 28,2 | Фосфоръ P 31,0 | Сера S 32,06 | Хлоръ Cl 35,45 | |
| 4 | Аргонъ Ar 38 | Калій K 39,15 | Кальцій Ca 40,1 | Скандій Sc 44,1 | Титанъ Ti 48,1 | Ванадій V 51,2 | Хромъ Cr 52,1 | Марганецъ Mn 55,0 | Железо Fe 55,9 / Кобальтъ Co 59 / Никель Ni 59 (Cu) |
| 5 | | Мѣдь Cu 63,6 | Цинкъ Zn 65,4 | Галлій Ga 70,0 | Германій Ge 72,3 | Мышьякъ As 75 | Селенъ Se 79,2 | Бромъ Br 79,95 | |
| 6 | Криптонъ Kr 81,8 | Рубидій Rb 85,5 | Стронцій Sr 87,6 | Иттрій Y 89,0 | Цирконій Zr 90,6 | Ніобій Nb 94,0 | Молибденъ Mo 96,0 | — | Рутеній Ru 101,7 / Родій Rh 103,0 / Палладій Pd 106,5 (Ag) |
| 7 | | Серебро Ag 107,93 | Кадмій Cd 112,4 | Индій In 115,0 | Оловo Sn 119,0 | Сурьма Sb 120,2 | Теллуръ Te 127 | Іодъ J 127 | |
| 8 | Ксенонъ Xe 128 | Цезій Cs 132,9 | Барій Ba 137,4 | Лантанъ La 138,9 | Церій Ce 140,2 | — | — | — | — |
| 9 | | — | — | — | — | — | — | — | |
| 10 | — | — | — | Иттербій Yb 172 | — | Тантанъ Ta 183 | Вольфрамъ W 184 | — | Осмій Os 191 / Иридій Jr 193 / Платина Pt 194,8 (Au) |
| 11 | | Золото Au 197,2 | Ртуть Hg 200,0 | Таллій Tl 204,1 | Свинецъ Pb 206,9 | Висмутъ Bi 208,5 | — | — | |
| 12 | — | — | Радій Rd 225 | — | Торій Th 232,5 | — | Уранъ U 238,5 | | |

Высшіе солеобразующіе оксиды:

| R | R²O | RO | R²O³ | RO² | R²O⁵ | RO³ | R²O⁷ | RO⁴ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

Высшія газообразныя водородныя соединенія:

| | | | | RH⁴ | RH³ | RH² | RH |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

**Эта периодическая таблица была помещена в восьмом издании «Основ химии», которое вышло в 1906 г. и было последним при жизни автора. Она уже очень похожа на таблицу, которую теперь изучают школьники, и очень отличается от первых вариантов. В ней значительно меньше пустых клеток. Уже заняли свои места предсказанные Менделеевым галлий, скандий и германий, уже открыт радий, который также был предсказан Менделеевым и описан под названием экабария. Открыты уже благородные газы, нашедшие свое место в таблице в новой, нулевой, группе. Но еще недостаточно изучены редкие земли, и их положение в таблице пока еще не определилось. Обратите внимание, что элементы в этой таблице еще не перенумерованы.**

Первым был открыт полоний, вслед за ним — радий. Это были новые элементы, их наука еще не знала. Радиоактивность этих элементов была в тысячи раз сильнее, чем у урана. Чудесные свойства резко отличали их от всех известных ранее элементов.

Довольно быстро, как только были изучены химические свойства новых элементов, они нашли свои места в периодической системе. Оказалось, что оба элемента — и полоний, и радий — также когда-то были предсказаны Менделеевым. Радий — это был экабарий, он занял 88-ю клетку в периодической системе, полоний — 84-ю. Его Менделеев называл **экателлуром**. Значит, место для них было, и казалось, что все благополучно. Но когда были изучены подробно свойства новых радиоактивных элементов, обнаружились совершенно неожиданные для науки явления.

Самым важным было то, что с открытием радиоактивных элементов рухнули привычные и, казалось, незыблемые представления о вечности и неизменности каждого элемента. Новые элементы были непостоянными, они рождались и исчезали, превращаясь в другие элементы. Одни из них исчезали в течение миллионных долей секунды, другие жили тысячи лет. Их свойство испускать невидимые лучи свидетельствовало о распаде атомов.

Было найдено, что радий — далекий потомок урана. Сам радий превращается в радиоактивный газ радон. И при каждом превращении радиоактивный атом обязательно испускает либо заряженные ядра атомов гелия ($\alpha$-частицы), либо электроны ($\beta^-$-частицы). Вскоре физики нашли более тридцати радиоактивных элементов.

Сколько потомков действительно оказалось у урана, вы можете сами подсчитать на вкладке к статье «Рождение, жизнь и смерть химических элементов» между страницами 288—289.

Не меньше потомков было найдено и у элемента тория, который также оказался радиоактивным. И почти столько же — в ряде актиния.

Перед наукой снова встал трудный и принципиально важный вопрос: где и как найти места в периодической системе для всех этих новых многочисленных элементов? Их было гораздо больше, чем оставалось свободных клеток в таблице. Эту задачу пришлось науке решать уже без участия Менделеева. Он не дожил до последнего, самого трудного испытания его великой идеи.

Химики занялись определением химических свойств новых радиоактивных элементов. Это была трудная задача. Ведь среди этих элементов были такие, которые «жили» ничтожные доли секунды. Разгадка была найдена, когда радиоактивные элементы были настолько изучены, что стало возможным сопоставить природу лучей, испускаемых элементом, с его химической природой и с природой того нового элемента, который из него образуется при радиоактивном превращении. Но разгадать все это удалось опять-таки с помощью периодической системы Менделеева.

Изучая свойства урана-$X_1$ — ближайшего потомка урана, его «сына», химики скоро убедились, что химическими свойствами он неотличим от давно известного тория. Но все же это не был знакомый химикам торий. Торий — обычный элемент, его радиоактивность так слаба, что ее трудно обнаружить. А уран-$X_1$ сильно радиоактивен, быстро распадается, через 24 дня от него остается только половина того количества, которое было раньше.

В общем это новый элемент. Но все же химически это торий. Если уран-$X_1$ смешать с торием, никакими химическими реакциями их разделить невозможно.

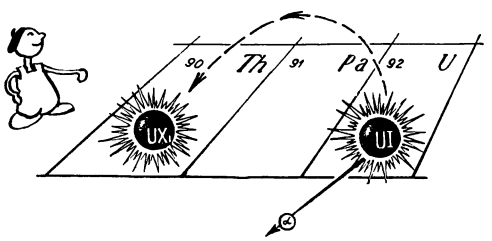



Рис. 1.

Уран превращается в уран-$X_1$, испуская α-лучи (рис. 1). На каждый распавшийся атом урана из его ядра вылетает α-частица и уносит два положительных заряда. Уран занимает 92-е место в таблице, в седьмом периоде. А где должен быть его первый потомок, уран-$X_1$? Менделеев поместил торий в 90-ю клетку своей системы. А уран-$X_1$ неотличим от тория. После долгих и трудных поисков и колебаний пришлось признать, что место для урана-$X_1$ — в клетке, где находится торий; **α-частица уносит из ядра атома два положительных заряда**, и при этом образуется новый атом, занимающий в периодической таблице место с номером, **на две единицы меньшим**.

Проследим теперь, что дальше происходит с ураном-$X_1$ при его распаде (рис. 2). Он испыты-

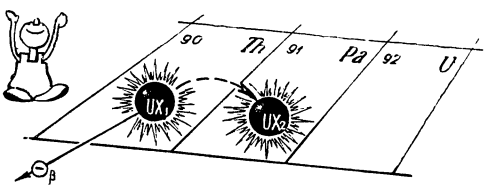



Рис. 2.

вает $\beta^-$-превращение, образуя новое радиоактивное вещество, которое было обозначено как уран-$X_2$, еще быстрее исчезающее. Оказалось, что по химическим свойствам уран-$X_2$ должен быть помещен в 91-ю клетку.

Но потеря одного отрицательного заряда ядром атома равноценна приобретению одного положительного заряда. В результате получилось, что **при увеличении положительного заряда ядра элемента на единицу** образуется новый элемент, занимающий в периодической системе клетку, **номер которой на единицу больше.** В свою очередь уран-$X_2$ снова теряет $\beta^-$-частицу (рис. 3) и превращается в уран-II, который совершенно неотличим от своего «прадеда» — обычного урана — и должен быть помещен в одной клетке с ним, т. е. занять 92-е место в таблице. И всегда увеличение в ядре положительного заряда на единицу (потеря одного отрицательного электрона) приводит к такому изменению химических свойств, которое соответствует увеличению порядкового номера элемента на единицу.

Этот закон, управляющий путешествием атомного ядра по менделеевской таблице при радиоактивном распаде, получил в науке название **«правило сдвига»**.

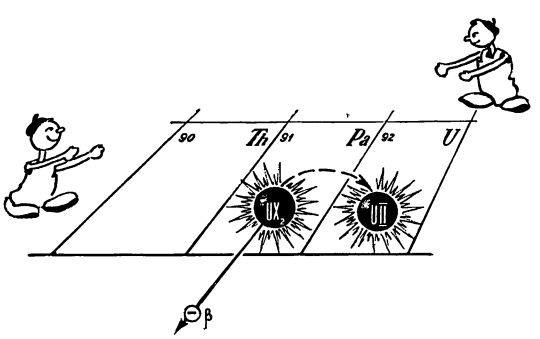



Рис. 3.

Изучая радиоактивные элементы, химики столкнулись с новым, невозможным и немыслимым с точки зрения старой химии, фактом. Посмотрите сами, что получилось. Атомный вес урана-238. Каждый атом его на пути ра-

диоактивного превращения до урана-II теряет последовательно одну α-частицу (т. е. ядро атома гелия, атомный вес которого 4) и две β⁻-частицы (это легкие, с ничтожной массой электроны). В результате заряд ядра атома радиоактивного урана-II оказывается таким же, как у обычного урана. И своими химическими свойствами он от обычного урана неотличим.

Но атомный вес становится, конечно, совершенно другим. Каждая вылетающая α-частица уменьшает атомный вес на четыре единицы, а при β-превращениях он остается таким же.

Изменение атомного веса урана:

| |
|---|
| U-I — α — β — β = U-II |
| 238 — 4 — 0 — 0 = 234 |

В одной и той же клетке, где, как считал Менделеев, должен быть только один элемент со своим, присущим только ему атомным весом, теперь оказались два разных вещества, с разными физическими признаками и, самое главное, хотя и с разными атомными весами, но с одинаковыми химическими свойствами. Оказалось, что **один и тот же элемент может обладать различным атомным весом.**

Но этого мало. Был получен еще более удивительный результат: при β-распаде атомный вес не меняется, а химическая природа элемента меняется очень резко.

Уран-$X_1$ по химическим свойствам — это торий, а уран-$X_2$ химически неотличим от элемента протактиния (Pa); следовательно, **у разных элементов может быть одинаковый атомный вес.**

Что же в конце концов получилось? Как основной признак элемента Менделеев принял атомный вес. Но в ряде радиоактивного распада урана конечный продукт — радий-G, его атомный вес **206**. Этот элемент уже неактивен, а химически неотличим от свинца.

При распаде тория, в конце концов, образуется тоже неактивный торий-D, его атомный вес **208**. По химическим свойствам это тоже свинец.

Ряд распада актиния обрывается на неактивном продукте — актинии-D, его атомный вес **207**, а химически он опять-таки свинец.

Но мало этого, в этих рядах есть еще радиоактивные промежуточные продукты распада: радий-B с атомным весом 214, радий-D с атомным весом 210, торий-B, атомный вес которого 212, и актиний-B с атомным весом 211.

И все эти радиоактивные элементы, все до одного, абсолютно сходны со свинцом, и все они обладают разными атомными весами.

Но ведь в каждой клетке может быть только один элемент с его собственным атомным весом! В клетке 82 может быть свинец с атомным весом 207,18. Изучая радиоактивные элементы, ученые нашли еще семь веществ с атомными весами 214, 212, 211, 210, 208, 207, 206 и химическими свойствами свинца.

Наука оказалась в очень большом затруднении. Как же их разместить в периодической таблице? Их нельзя считать разными элементами, все они — свинец, но считать одним элементом, одной разновидностью атомов тоже нельзя— у них разные атомные веса.

В конце концов, стало ясно, что все они должны занимать одно место в таблице Менделеева. Именно поэтому их так и называют — «изотопы» (от греческих слов: «равный» и «место»).

Кроме того, оставалось необъяснимой загадочная непоследовательность в ходе изменения величины атомного веса у пар элементов аргон— калий, кобальт — никель, теллур — йод. Сам Менделеев был вынужден расположить их в таблице, нарушив порядок увеличения их атомных весов: аргон был «тяжелее» калия, кобальт — никеля, теллур — йода.

Это испытание для периодического закона было очень тяжелым. Оно поставило под сомнение основу периодической системы. Стало совершенно ясно, что атомный вес не может служить величиной, которая определяет химические свойства элемента. И наука снова встала перед большой задачей.

## В ЧЕМ ОСНОВА ВЕЛИКОГО ЗАКОНА?

Периодический закон — великий закон природы,— открытый Менделеевым, остается незыблемым. Но атомный вес, принятый им в качестве основной характеристики химического элемента, не выдержал испытание.

Именно изучение радиоактивных элементов дало возможность найти ответ на этот вопрос, важный для познания окружающего нас мира. Что же заменило атомный вес? Что вместо него определяет теперь положение каждого элемента в нашей современной менделеевской таблице?

Проследите внимательно по периодической системе элементов за путешествием распадающегося радиоактивного ядра (рис. 4 и табл. у стр. 288). По пути атом от урана до свинца побывает в десяти клетках двух последних рядов

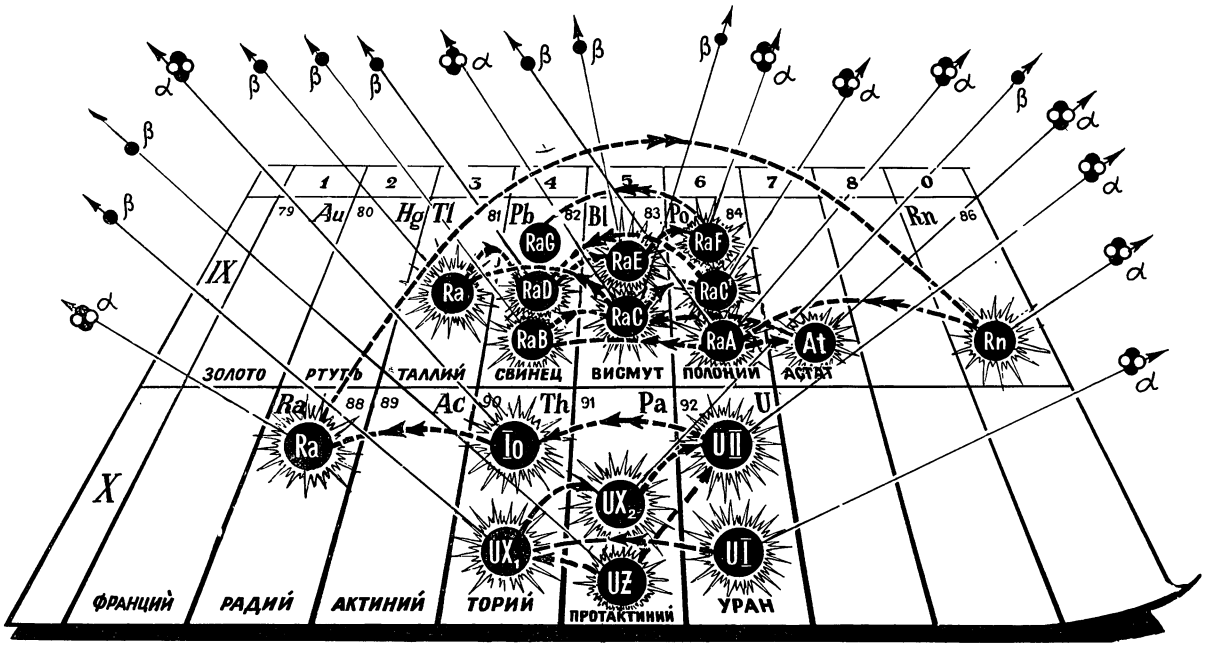



**Рис. 4. Нужно очень внимательно проследить за «путешествием» потомков атома урана по периодической таблице. При каждом β-распаде у них меняется заряд, а при α-распаде изменяется и масса. Что же определяет химические свойства получающегося ядра? Теперь не пользуются устаревшими названиями U-I, U-$X_1$ и т. п. Принято называть изотопы просто по названию элемента с добавлением его массового числа. Вместо U-I говорят U-238, вместо U-$X_1$—Th-234. Составьте сами таблицу изотопов, образующихся при распаде урана-238.**

таблицы Менделеева. Он испытает **четырнадцать** последовательных превращений, образуя по дороге **восемнадцать** изотопов **десяти** различных элементов. Некоторые атомы на этом пути даже распадаются сразу по двум направлениям.

При этом атом урана, превращаясь, в конце концов, в атом свинца, теряет восемь α-частиц и шесть $\beta^-$-частиц. Этому соответствует потеря **десяти положительных зарядов**:

$$8 \times (+2) + 6 \times (-1) = 10.$$

При этом с химическим элементом происходят такие глубокие изменения его химической природы, которые соответствуют его перемещению из той клетки таблицы, где находится место урана, в ту, где должен быть свинец. **Десяти** потерянным положительным зарядам соответствует перемещение на **десять** последовательных клеток в таблице Менделеева.

Таким образом, химия радиоактивных элементов показала, что в основе периодического закона должен лежать другой фундамент: не атомный вес, а положительный заряд атомного ядра.

На помощь химикам пришла физика. Была предложена модель строения атома. Атом оказался сложным: вокруг положительно заряженного тяжелого ядра вращаются отрицательные электроны; их ровно столько, сколько положительных зарядов в ядре. Это и стало решающим для понимания основы периодического закона. Оказалось, что **заряд атомного ядра любого элемента численно равен порядковому номеру этого элемента в таблице Менделеева.** Прямое опытное доказательство этому нашел молодой талантливый английский физик Мозли, который в расцвете сил погиб во время первой мировой войны. Ему было всего лишь около 24 лет, когда он сделал замечательное открытие. Изучая рентгеновские спектры элементов, Мозли нашел, что длина волны рентгеновского излучения зависит от места, которое занимает этот элемент в таблице Менделеева, от порядкового номера элемента. Измерив длину волны рентгеновского излучения элемента, оказалось возможным вычислить порядковый номер элемента. И этот номер действительно оказался равным числу положительных зарядов в ядре атома элемента.

Сложными, трудными путями развивается наука. Конечно, только знание, как построен атом, помогло физике понять огромное значение порядкового номера элемента — основы перио-

дического закона. Но никогда не удалось бы узнать, как построен атом, если бы у исследователей, ученых не было яркого путеводного маяка — периодического закона. Без него было бы невозможно проникнуть внутрь атома и овладеть его энергией. Без него стало бы немыслимым величайшее проявление могущества человеческого гения — создание новых искусственных элементов.

Если бы Менделеев не открыл периодический закон, несомненно, этот закон все равно был бы открыт. Но кто может сказать, на сколько лет задержалось бы развитие науки!

Естественная, как назвал ее Менделеев, система элементов не только требовала объяснить загадочную тайну периодичности, но она же и руководила наукой в поисках разгадки.

## НОВЫЙ СМЫСЛ И ЗНАЧЕНИЕ АТОМНОГО ВЕСА

Менделеев считал, что химические свойства элементов зависят от их атомных весов. Это оказалось не так. Место в менделеевской таблице, а следовательно, и всю химию элемента определяет не его атомный вес, а атомный номер — заряд его ядра.

Значит ли это, что атомный вес оказался науке больше ненужным и что теперь все его значение ограничивается очень полезной, но скромной ролью при расчетах состава вещества в процессе химического анализа?

Нет. Для физики значение атомного веса не только не уменьшилось, но, пожалуй, даже неизмеримо возросло, особенно с точки зрения практики. Масса атома в настоящее время стала основной величиной для всех расчетов ядерной энергетики и ядерной химии. Не зная точное значение атомной массы, абсолютно невозможно установить механизм ядерных реакций и рассчитать количество энергии.

Недоступный прямому восприятию, до сих пор еще никем не виденный атом ученые научились взвешивать с точностью в сотни и даже в тысячи раз большей, чем мы можем измерять любую другую величину в окружающем нас мире.

### Единица шкалы атомных весов

Запомните, что теперь

$$^1/_{12}\,[_6C^{12}] = 1.$$

При составлении самой первой таблицы периодического закона Д. И. Менделеев принимал атомный вес водорода равным единице и сравнивал с ним атомные веса всех других элементов.

На Международном съезде химиков в 1860 г. было решено принять водород за основу шкалы атомных весов. Почти полстолетия самый легкий элемент водород занимал это почетное место. Только в 1906 г. химики перешли к кислородной шкале, за основу шкалы атомных весов принят был атомный вес кислорода — его $^1/_{16}$ часть. Это, конечно, было гораздо удобнее, так как кислород образует соединения почти со всеми элементами.

Когда было открыто, что в природе существуют три различных изотопа кислорода и что содержание их в природном кислороде непостоянно, физики установили для себя «физическую» шкалу атомных весов. Они условились считать единицей для атомных весов $^1/_{16}$ веса атома наиболее распространенного легкого изотопа кислорода и вес его считать равным точно шестнадцати. Это устраняло погрешность, происходящую из-за непостоянства изотопного состава кислорода разного происхождения.

Долгое время в науке было такое «двоевластие». При современной высокой точности измерений это стало приводить к очень многим недоразумениям и ошибкам. Кроме того, выяснилось, что изотоп $O^{16}$ не оправдывает возлагавшихся на него надежд и не может обеспечить необходимую точность. Он оказался неудобным эталоном для атомных весов.

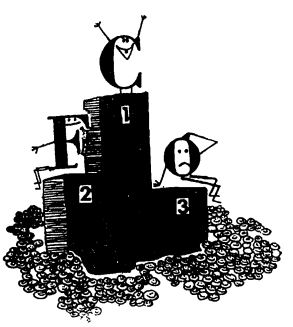
Совсем недавно, в период 1958—1961 гг., ученые еще раз пересмотрели этот исключительно важный не только для химии, но и для всего естествознания вопрос: что должно быть положено в основу современной шкалы точных атомных весов? После многочисленных тщательных исследований и подробных обсуждений было установлено, что из всех элементов только два могут претендовать на почетную роль основной константы химии и физики — фтор и углерод.

У фтора только один изотоп, и атомный вес элемента фтора — постоянная величина. Была предложена «фторная» шкала, в которой $^1/_{19}[_9F^{19}]=1$.

У углерода два изотопа, но зато его соединения с водородом очень удобны для непосредственного сравнения масс атомов различных изотопов почти всех элементов. Это—важное преимущество углерода. Многие ученые настаивали на углеродной шкале, в которой за основу принимали наиболее распространенный изотоп $C^{12}$.

Поскольку обе эти новые шкалы для атомных весов обладали каждая своими важными и ценными преимуществами, было решено провести всемирное голосование (опрос) ученых — химиков и физиков: какую шкалу — «фторную» или «углеродную» — они предпочитают?

В этом всемирном опросе приняли участие и ученые нашей страны. Победил углерод. Было решено за основу новой единой шкалы атомных масс принять атом изотопа углерод-12 и считать $^1/_{12}\,[_6C^{12}]=1$.



Вот с какой точностью измеряются теперь массы атомов:

$H^1$—1,007 825 22
$D^2$—2,014 102 19
$He^4$—4,002 603 61
$N^{14}$—14,003 074 38
$O^{16}$—15,994 914 94

Чтобы почувствовать, зачем нужна такая огромная точность, попробуйте сами рассчитать из этих значений, сколько энергии получается на Солнце при синтезе гелия из килограмма водорода. Стоит ли синтезировать его из дейтерия? Сколько энергии получается в звездах за счет «выгорания» гелия, в результате чего образуется углерод? Без точных значений атомных масс наука обойтись не может.

## ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН—ЗАКОН СТРОЕНИЯ АТОМА

Тайна периодической системы элементов была разгадана, когда удалось понять сложнейшую структуру атома, строение его внешних электронных оболочек, законы движения электронов вокруг положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома.

Сотни и тысячи талантливых и самоотверженных ученых трудились, выясняя структуру атома. Они шли к ней разными путями и с разных сторон. Теоретики и экспериментаторы, физики и химики, открывая новые факты, отыскивая новые закономерности, всегда сопоставляли свои результаты и выводы с системой Менделеева.

Долгим и трудным путем шла наука к разгадке великой тайны периодического закона. Он воплотил в себе все необозримое многообразие бесконечного множества химических процессов и превращений в окружающем нас мире. Он внес ясность и порядок в химию, где до него царствовал хаос отрывочных и несвязанных сведений, фактов, наблюдений, накопленных многими поколениями химиков.

Почему элементы так послушно повинуются закону Менделеева? Почему существует таинственная правильная повторяемость свойств у химических элементов? Почему натрий похож на калий, а фтор сходен с хлором? Почему кислород и сера присоединяют по два атома водорода, а атомы углерода и кремния образуют соединения, в которых по четыре водородных атома? Почему химик, хорошо изучивший таблицу Менделеева, заранее скажет, какие соединения могут возникнуть при взаимодействии различных элементов?

Какова таинственная причина этих поистине удивительных закономерностей, управляющих течением всех химических реакций между всеми элементами, дающих бесчисленное множество соединений, из которых состоят все тела в окружающем нас мире, не только на нашей Земле, но и далеко за ее пределами, в безграничном космосе?

Много, очень много можно задать подобных вопросов. Ответ на них один. Все химические и физические свойства вещества определяются строением атомов. Великий закон, открытый Менделеевым, потому и есть всеобщий закон природы, что он выражает закон строения атома.

## АТОМ САМ РАССКАЗАЛ О СВОЕМ УСТРОЙСТВЕ

Атом... Само его имя — «неделимый» отражает почтительную робость науки недавнего прошлого перед его непостижимостью. До сих пор его еще никто не видел. Никакие примеры и сравнения не могут дать правильное представление о его размерах.

Как же невообразимо сложно должен быть построен атом. Ведь его строение определяет бесконечное многообразие всего, что нас окружает. А ведь вокруг нас неисчерпаемый, безграничный мир, замечательный и прекрасный, полный света и красок.

И все, что мы видим на всем доступном нам протяжении безграничности мироздания,— все это состоит из немногих, аккуратно разложенных Менделеевым по клеткам его таблицы различных видов атомов.

Проникнуть в тайну того, как построен атом, помогло изучение спектров. Оказалось, что атом сам рассказывает о себе на удивительном и красочном языке, на языке спектральных линий испускаемого атомом света. Но ученые долго не могли понять его загадочный шифр. И в самом деле, попробуйте представить себя в положении человека, которому необходимо разгадать устройство механизма никогда им не виданного рояля, только слушая исполняемые на нем музыкальные произведения. Перед физиками же стояла задача неизмеримо труднее, но они сумели с ней справиться. Правда, для того чтобы понять шифр спектральных линий, им пришлось создать новую науку — механику микромира, квантовую механику.

Атом действительно очень сложен. И до сих пор не все еще в его строении разгадано и изучено. Но основной закон строения атома оказался удивительно простым.

## В АТОМЕ НЕ МОЖЕТ БЫТЬ ДВУХ ОДИНАКОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

А разве электроны могут быть разными? Быть может, электрон на Марсе отличается от электрона на Сириусе? Или электроны в атоме железа не похожи на электроны, вращающиеся в атомах водорода? Нет. Физики совершенно точно знают, что все электроны, во всем мироздании, повсюду совершенно одинаковы.

Чем же тогда они различаются в атоме? Почему от этого зависят химические свойства элементов? Как периодический закон Менделеева связан со строением атома?

Эти вопросы очень трудны. Хотя они еще не все и не полностью решены наукой, но все же очень много тайн в строении атома уже разгадано. Хотите узнать их? Тогда прочтите внимательно, лучше с карандашом в руках, чтобы самому просчитать все оболочки и орбиты, следующую главу.

## КАК ЖЕ ВСЕ-ТАКИ МОЖЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ АТОМ?

Конечно, попытка «наглядно» изобразить атом на бумаге совершенно безнадежна. Всякий рисунок неподвижен, любое изображение статично. Атом — это вечный вихрь движения. Его нарисовать нельзя. Но графическая схема может все же помочь понять устройство атома, осмыслить результаты опыта и теоретического расчета.

### Главные квантовые числа и электронные оболочки атома определяют энергию электронов

Атом сам на языке спектра рассказывает, что электроны, вращающиеся в нем вокруг ядра, различаются между собой. Они расположены на различных расстояниях от ядра, движутся по орбитам разной формы, у них различная скорость, а самое главное — различная энергия.

Опыт и квантово-механический расчет показывают, что в каждом атоме может быть несколько групп электронов, различающихся между собой по энергии, которые образуют вокруг атомного ядра несколько электронных оболочек.

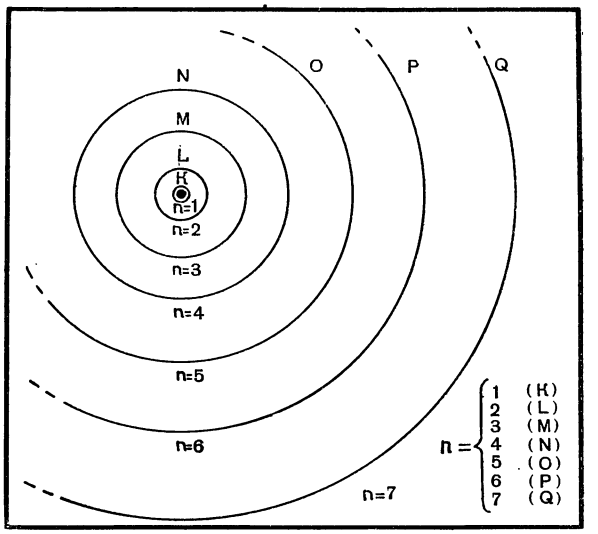



**Рис. 5. Схема всех возможных электронных оболочек в атоме. Диаметры их определяются энергией электрона и пропорциональны главному квантовому числу $n$.**

На рисунке 5 они обозначены условно окружностями. Возле каждой из оболочек указано целое число: 1, 2, 3 до 7 — это ее главное квантовое число $n$. Физики привыкли обозначать главные квантовые числа буквами из середины алфавита по порядку: самая близкая к атомному ядру $K$-оболочка, а затем идут $L$-, $M$-, $N$-, $O$-, $P$- и $Q$-оболочки. От того, на какой из оболочек находится электрон, и зависит его энергия. Это очень важно. На ближайшей к ядру $K$-оболочке он обладает наименьшей энергией. Правильнее будет представлять себе электронные оболочки в виде концентрических сфер и считать их изображением энергетических уровней электронов в атоме.

Атом при переходе электрона с одного из внешних уровней на более глубокий излучает один фотон — квант лучистой энергии. Такие переходы электронов в атомах происходят всегда. Поэтому наши глаза и могут видеть.

### Побочные квантовые числа определяют тип орбиты

К сожалению, эта простая картина атома не соответствует действительности. Выяснилось, что электроны, принадлежащие к одной и той же оболочке, могут двигаться по орбитам раз-

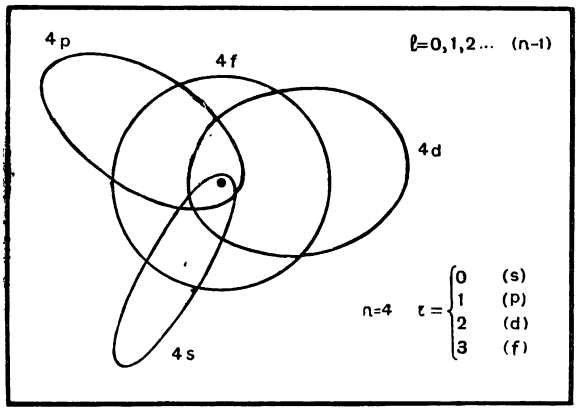



**Рис. 6. Схема всех типов электронных орбит только одной N-оболочки атома. Читатель может легко сам начертить такую схему для любой другой оболочки. Только нужно иметь в виду, что отношение $l$ полуосей в эллипсах должно быть равно $\frac{l+1}{n}$.**

ного типа. Недавно еще считали, что их можно представить себе эллиптическими. Теперь думают, что такие попытки просто бесполезны и ненужны. Важно общее число различных типов электронных орбит в каждой оболочке, и очень важно, что все они разные. Физики даже говорят о существовании электронных подоболочек внутри каждой главной оболочки. Их число зависит от главного квантового числа $n$ и равно ему. Каждый тип орбит, образующих подоболочку, характеризуется побочным квантовым числом $l$. Как и все квантовые числа, оно тоже целое число и может изменяться от 0 до $n - 1$.

На рисунке 6 вы видите попытку изобразить в качестве примера типовые орбиты всех подоболочек **только одной** $N$-оболочки любого атома.

Физики любят традиции и предпочитают сохранять старые буквенные обозначения для электронных подоболочек: буквы $s$, $p$, $d$ и $f$. Это начальные буквы названий серий спектральных линий: резкая, главная, диффузная и фундаментальная. Они соответствуют побочным квантовым числам: 0, 1, 2, 3.

Однако и этого мало. Схема атома значительно сложнее. Каждая из электронных подоболочек состоит из одинаковых орбит, но число этих орбит в них различно.

## Число орбит определяется магнитными квантовыми числами

Из того, как ведут себя спектральные линии при излучении атомов в магнитных полях, было установлено, что в любой из главных электронных оболочек принадлежит к каждому типу строго определенное число электронных орбит. Оно зависит только от второго побочного квантового числа и определяется третьим целым числом — «магнитным» квантовым числом $m$, у которого может быть $2l + 1$ значений: от $-l$ до $+l$.

Понять это не очень трудно: каждый электрон, вращаясь на орбите вокруг ядра, по существу, представляет собой один виток обмотки, по которому идет электрический ток. При этом возникает магнитное поле, поэтому каждую орбиту в атоме можно рассматривать как плоский магнитный листок. При наложении внешнего магнитного поля каждая электронная орбита будет с этим полем взаимодействовать и будет стремиться занять в атоме определенное положение (рис. 7). Энергия каждой из орбит изменится, и в соответствии с этим изменится и энергия фотонов.

Но и это еще не все.

## Число электронов на орбите зависит от спинового квантового числа

Поведение атомов в сильных неоднородных магнитных полях показало, что каждый электрон в атоме ведет себя как магнитик. А это указывает на то, что электрон вращается вокруг своей собственной оси, словно планета на орбите. Это свойство электрона получило образное название «**спин**» (английское слово «спин», по-русски — «прясть», «вращать»).

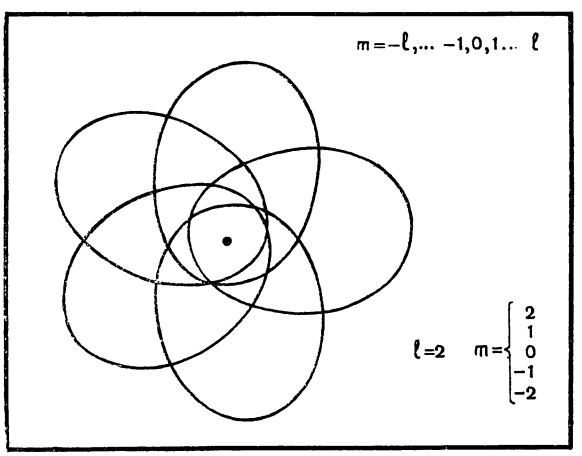



**Рис. 7. Орбит только одного типа $d$ в одной только электронной оболочке может быть пять. Сообразите сами, в каких оболочках возможны такие орбиты. Правильнее представлять себе, что все они различно ориентированы в пространстве.**

В отличие от вращения обычных тел в нашем микромире, где возможны любые скорости вращения, вращательное движение электрона постоянно и неизменно. Это его неотъемлемое свойство. Вращение электрона совершенно необычно: ни замедлить, ни ускорить, ни остановить его нельзя. Оно одинаково для всех электронов в мире.

Но хотя спин — общее свойство всех электронов, в нем причина различия между электронами в атоме. Два электрона, вращаясь на одной и той же орбите вокруг ядра, обладают одним и тем же спином, и все же они могут различаться направлением собственного вращения. При этом изменяется знак момента количества движения и знак спина (рис. 8).

Квантовый расчет приводит к двум возможным значениям спиновых квантовых чисел, присущих электрону на орбите: $s = +\frac{1}{2}$ и $s = -\frac{1}{2}$, других значений быть не может. Поэтому в атоме на каждой орбите могут вращаться либо два, либо только один электрон. Больше быть не может.

Не смешивайте, пожалуйста, буквенное обозначение второго квантового числа $l = 0$ с четвертым квантовым числом. И то и другое обозначают одной и той же буквой — $s$. Наверное, просто потому, что физикам давно уже не хватает букв для их формул.

Эта теория, во многом прояснившая сложное строение атома и связавшая в единое целое его оптические и химические свойства, основана на представлениях, впервые предложенных замечательным датским физиком Нильсом Бором.

## ТАК НА ЧТО ЖЕ ПОХОЖ АТОМ?

Графическое искусство бессильно изобразить строение атома. Пожалуй, единственная надежда остается на собственное воображение. Пусть те из читателей, у кого оно достаточно развито, предварительно подсчитают и даже вычертят орбиты всех типов для всех возможных электронных оболочек атома. А затем попытаются представить себе для наглядности электроны в виде ярко светящихся шариков, которые кружатся каждый на своей орбите с невообразимо огромной скоростью. Тогда для глаза каждый электрон должен был бы превратиться в сверкающую кривую своей эллиптической орбиты. Но орбита его не может быть неподвижной: атом и неподвижность несовместимы. Сами электронные орбиты также меняют свое взаимное положение, в своем движении они описывают сложные и причудливые объемные фигуры, сливаясь в мерцающее фантастическое сияющее облако — в электронный вихрь.

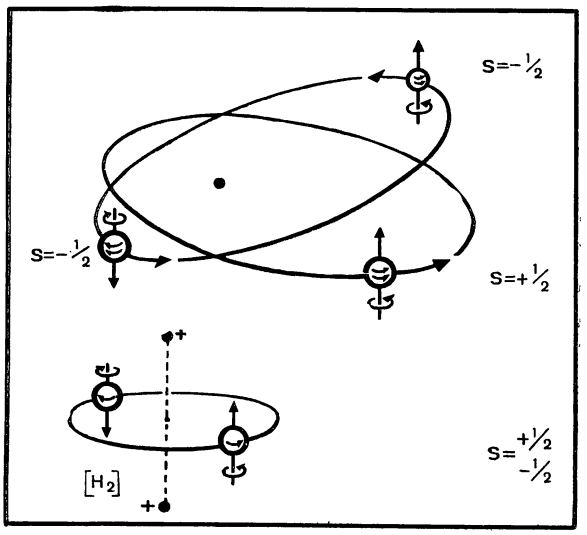
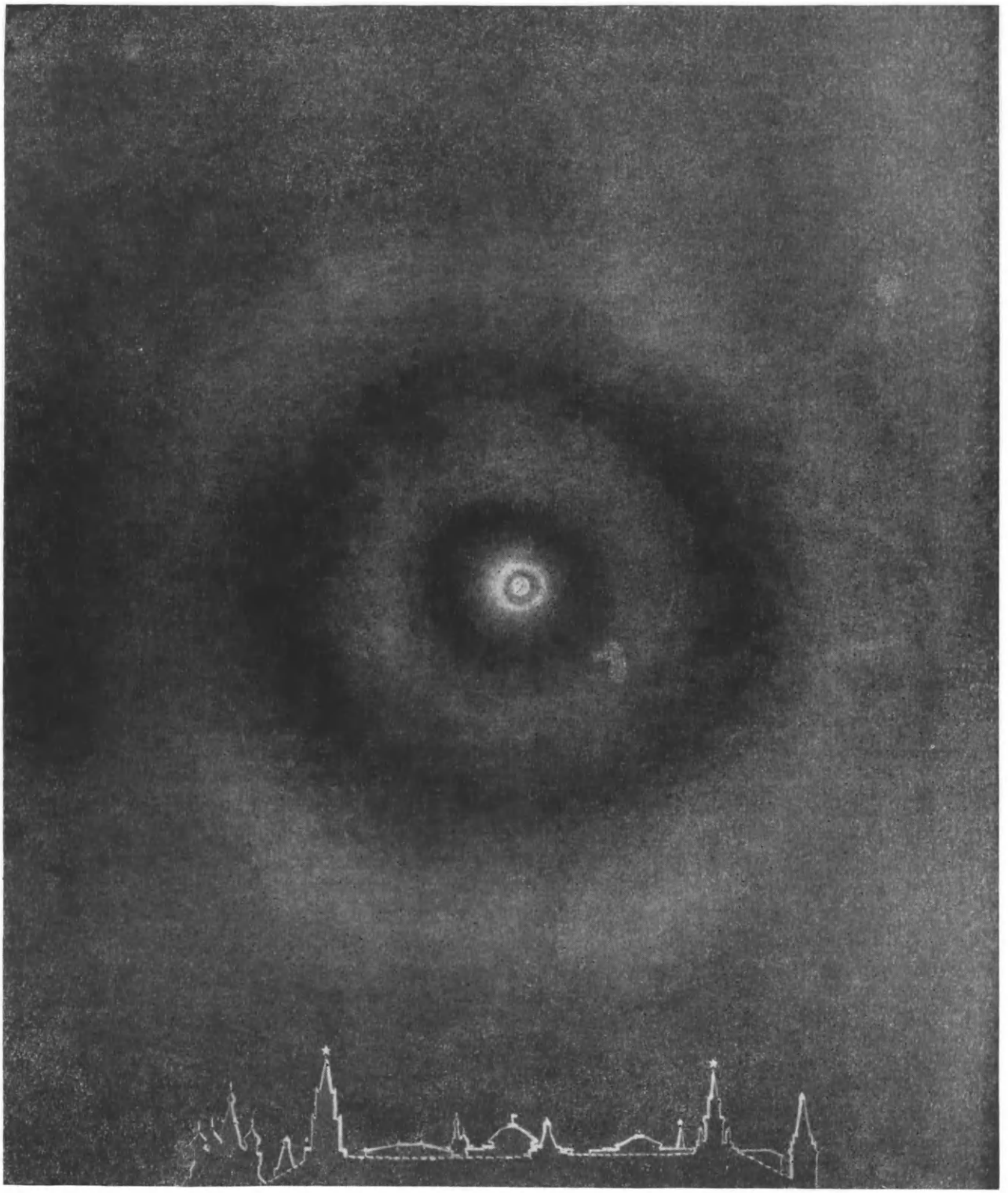



**Рис. 8. На каждой отдельной орбите может быть либо только два «спаренных» электрона, либо один «неспаренный». Существование в атоме неспаренного электрона имеет очень большое значение для химической характеристики элемента. От него зависит возможность образования молекул (например, молекулы водорода).**

В одних местах оно будет ярче: в них электронная плотность выше. В других — оно будет тусклым: вероятность пребывания в них электронов будет меньше. Но никаких отдельных электронов в этом электронном облаке различить нельзя.

Современная физика так и представляет себе атом в виде электронного облака со сложной структурой. Это облако сплошное и непрерывное. Где, в каких его точках в каждый момент находятся электроны — определить нельзя. Не только потому, что мы еще не обладаем средствами для такого наблюдения, но и потому, что электроны внутри атома проявляют свою двойственную природу — они ведут себя как волны.

Лучший друг и помощник фантазии и воображения — точная математика сумела рассчитать для простейших атомов вероятность нахождения электронов в каждой точке облака. Результат такого квантово-механического расчета атома натрия изображен на рисунке на следующей странице. Если вообразить себе атомное ядро с диаметром в один сантиметр, увеличив его всего лишь в десять тысяч миллиардов раз, то диаметр электронного облака будет около километра.



Вот так выглядел бы атом натрия, если представить себе, что его ядро увеличилось бы до размера в один сантиметр, а электроны стали бы ярко светящимися шариками.

## ЗАКОН СТРОЕНИЯ АТОМА

Удивительна простота основного закона, к которому свелась первоначальная бесконечная сложность его строения. Вся прихотливость поведения электронов во внешней оболочке атома, управляющая всеми его свойствами, может быть выражена необычайно просто: **в атоме нет и не может быть двух одинаковых электронов.** Теперь смысл этого закона нам ясен. Все электроны в атоме должны иметь разный «набор» значений четырех квантовых чисел: $n$, $l$, $m$, $s$. Зная же общее число электронов в данном атоме, которое равно его порядковому номеру в менделеевской таблице, мы можем сами «строить» атом, можем сами рассчитывать структуру его внешней электронной оболочки — определять, сколько в ней электронов и какие они в ней. Этот закон известен в науке, по имени швейцарского физика-теоретика, как принцип Паули.

## ФОРМУЛА АТОМА

Структуру внешней оболочки атома принято выражать своеобразной формулой. На основании только одних теоретических квантовых расчетов мы можем написать ее для любого легкого атома, вплоть до аргона. Для остальных атомов пока еще не хватает теории, и приходится привлекать на помощь опытные данные.

Формулу атома, по странной традиции, принято писать в несколько необычной форме. Но к ней нетрудно привыкнуть. Главное квантовое число физики условились записывать соответствующей цифрой, а побочное — буквой; число же электронов — помечать сверху справа. В атоме водорода только один электрон, поэтому у его формулы простой вид: $\boxed{1s}$. У гелия два электрона. Согласно правилам квантования, в одной и той же оболочке не может быть больше двух $s$-электронов. Поэтому формулой гелия

$$\boxed{1s^2}$$

завершается первый период. Третий электрон может занять только следующий уровень с главным квантовым числом $n = 2$, в котором также есть $s$-электроны. Следовательно, формула электронной оболочки для атома лития будет

$$\boxed{1s^2 2s},$$

а для бериллия $\boxed{1s^2 2s^2}$.

Все $s$-электроны исчерпаны, поэтому пятый элемент — бор должен иметь формулу:

$$\boxed{1s^2 2s^2 2p}.$$

Тому из читателей, который хочет в будущем стать хорошим химиком, равно и тем, кто собирается посвятить себя атомной физике, или кому по душе свет и его таинственные спектры, очень советуем еще раз перечитать предыдущие разделы о квантовых законах строения электронных оболочек атома и самим составить формулы для всех атомов трех первых периодов.

Для проверки приводим строение электронной оболочки натрия, у которого его одиннадцать электронов распределены в соответствии с формулой $\boxed{1s^2 2s^2 2p^6 3s}$. Думаем, что и у вас получился такой же результат.

## ПРИЧИНА ПЕРИОДИЧНОСТИ В СВОЙСТВАХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наверное, у многих из читателей этой статьи при знакомстве с разделом, посвященным строению электронной оболочки атома, уже возникло совершенно законное недоумение. Ведь все, что было рассказано о законах квантовых чисел, управляющих постройкой атомов, все это — результат приложения квантовой механики к изучению спектров различных элементов. В этом разделе не говорилось ни о химических свойствах, ни о законе периодичности. Так какое же отношение имеют эти удивительные сочетания простых чисел, объяснившие сложность и запутанность спектральных линий, к химии, к великому периодическому закону?

В природе существует глубокая внутренняя связь даже самых несходных и далеких явлений и процессов. Свет и химия не лежат в ней на разных полках. Оба эти глубоко различные начала тесно связаны. Исследования спектров помогли выяснить строение атома, а знание структуры электронной внешней оболочки помогло понять причину периодичности в изменении свойств химических элементов. Эта причина заложена в периодичности строения электронных оболочек атомов. От этого и зависят все химические свойства элементов.

В самом деле, к чему привели нас квантовые числа электронов, управляющие их поведением в атоме? Ведь они получены на основании теории, созданной для объяснения спектров, совершенно независимо от исследования химических свойств элементов.

1. Доказано, что электронная внешняя оболочка атомов имеет периодическое строение. По мере увеличения заряда атомных ядер электроны начинают периодически заполнять новые слои электронной оболочки — размещаются на новых энергетических уровнях.

2. Доказано, что при этом в атоме должны повторяться одинаковые по строению и по числу электронов подгруппы в каждой последующей оболочке.

3. Сходство элементов определяется одинаковым строением наружного слоя электронной оболочки в их атомах.

Литий $\boxed{1s^2\ 2s}$ потому и стоит в одной группе менделеевской таблицы вместе с натрием $\boxed{1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s}$, что у обоих на внешней орбите по одному $s$-электрону.

Пожалуйста, не сочтите, что на этом теория строения атома завершена и теперь все совершенно ясно: стоит только без ошибки рассчитать по всем правилам квантовой механики и написать формулу атома — и сразу перед опытным и знающим химиком раскроются все необозримые тайны химических свойств любого элемента. Это не так. Никакая теория не может до конца охватить неисчерпаемое многообразие действительности. Как бы глубоко мы ни проникли в атомный микромир, все равно будем стоять только на пороге неведомого.

Теория строения атомных оболочек дала химии очень много. Мы теперь точно знаем, **какие** электроны могут быть в атоме, точно знаем, **сколько** их может быть в каждой из его оболочек. Но мы еще не знаем точно, в **каком порядке** они должны заполнять орбиты по мере роста порядкового номера элемента.

В первых трех периодах заполнение идет просто в порядке последовательности. Почему это так, мы тоже не знаем. А дальше, чтобы определить строение атома, приходится привлекать на помощь опытные данные, полученные при изучении тонкой структуры спектральных линий и химического поведения элемента.

Теоретический расчет, выраженный в несложных правилах комбинаторики простых чисел, очень многое сделал ясным в периодическом законе, но далеко еще не все.

Нельзя не поражаться гению Менделеева. Он сумел уловить великое единство в необъятном хаосе, в беспорядке накопленных до него химиками разрозненных фактов и сведений. Он сумел установить естественный закон химических элементов в то время, когда еще почти ничего не было известно о строении вещества. Менделеевская таблица на долгие годы определила все развитие науки о веществе. Но и теперь, почти через 100 лет после открытия периодического закона, пока еще даже квантовая теория не может в ней объяснить все полностью.

## СТРОЕНИЕ АТОМА И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Все свойства вещества, конечно, полностью определяются строением атомов. Радиоактивность, способность к ядерным превращениям зависят от природы и строения атомного ядра. Оптические свойства элемента, его атомные спектры определяются строением электронной оболочки атома, совокупностью всех его электронов.

Химическое поведение элемента зависит от его наружных электронов. Особенно важную роль в химии каждого элемента играют его самые внешние электроны. Чаще всего это $s$- и $p$-электроны, иногда $d$-электроны.

## СТРОЕНИЕ АТОМА И ХИМИЯ

В атоме первого элемента таблицы Менделеева — водорода только один $s$-электрон. Немногие вещества обладают такой химической активностью, как атомарный водород. Именно благодаря примеси свободных атомов водород в момент выделения из связывающих его соединений (in statu nascendi, как говорили еще древние алхимики) обладает удивительной способностью к самым разнообразным химическим превращениям.

Сосед водорода по таблице — гелий. В его атоме на одной орбите два $s$-электрона. Обратите внимание на то, что оба эти электрона, образующие гелиевую орбиту,— **спаренные**. Они вращаются в разные стороны, каждый вокруг своей оси. Два таких электрона и придают несокрушимую прочность атому гелия.

Два атома водорода соединяются в одну молекулу, и при этом в очень прочную молекулу. За счет пары электронов эти атомы образуют гелиеподобную, общую для обоих атомов, орбиту (рис. 9).

Гелий, как и другие благородные газы, в атомах которых все электроны спаренные, почти не способен образовывать молекулы. В свободном газообразном состоянии он существует в виде отдельных атомов.

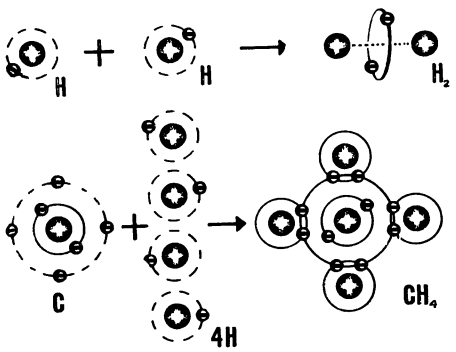



**Рис. 9.** *Наверху* — схема образования молекулы водорода из двух водородных атомов. *Внизу* — схема образования молекулы газа метана из атома углерода и четырех атомов водорода.

Запомните эту очень важную и удивительную способность двух *s*-электронов образовывать общую очень прочную орбиту. Это может происходить, даже если оба электрона принадлежат двум разным атомам. Такое свойство электронов имеет особенно большое значение для химии. Именно благодаря этому и могут возникать очень прочные связи между атомами, могут образовываться и существовать молекулы.

Химики такую химическую связь называют г о м е о п о л я р н о й.

Насколько важны для химии внешние электроны атома, можно судить хотя бы по тому, что именно их число и определяет валентность элемента.

У лития, натрия, калия — одновалентных элементов — на внешней орбите атомов по одному *s*-электрону. Бериллий, магний, кальций потому и двухвалентны, что на их внешних орбитах по два *s*-электрона.

Элементы неон, аргон, криптон, ксенон обладают одинаково построенными наружными электронными оболочками из восьми электронов $s^2p^6$. Эти оболочки очень прочны. Атомы благородных газов, стоящих в нулевой группе периодической таблицы, держат свои электроны очень крепко.

Если атомы металлов калия, кальция, алюминия и других элементов, стоящих в первых группах таблицы, потеряют свои слабо связанные наружные электроны, то их электронные оболочки станут такими же, как оболочки атомов ближайших благородных газов, стоящих перед ними в таблице.

У элементов, например, седьмой группы во внешней электронной оболочке по семь электронов. Если такой атом захватит еще один электрон, то его наружная электронная оболочка станет такой же, как у ближайшего следующего за ним в таблице элемента нулевой группы.

При химических реакциях происходит перераспределение наружных электронов: электронные оболочки стремятся стать такими же, как у ближайших благородных газов. Тот из атомов, который отдает электрон, становится заряженным положительно, атом же, захвативший электрон, будет заряжен отрицательно. Разноименно заряженные атомы начнут благодаря силам электростатического взаимодействия притягиваться друг к другу. Так возникает еще один тип химической связи. Химики ее называют г е т е р о п о л я р н о й.

Таким образом, силы, связывающие атомы в молекулы, возникают в результате взаимодействия положительных ядер и отрицательных электронных оболочек атомов. Это взаимодействие всегда стремится так перестроить внешнюю электронную оболочку, чтобы она стала наиболее прочной, наиболее устойчивой, такой же, как у ближайшего элемента нулевой группы.

Рассмотрите внимательно простую химическую реакцию, записанную в не совсем обычной для школьного учебника форме:

$$[1s^22s^22p^63s]+[1s^22s^22p^5]=[1s^22s^22p^6]^+\cdot[1s^22s^22p^6]^-$$
$$\text{Na} + \text{F} = \text{NaF}$$

и сравните результат с формулой электронной оболочки благородного газа неона $[1s^22s^22p^6]$.

## ПОЧЕМУ ВОДОРОД СТОИТ ОДНОВРЕМЕННО В ДВУХ КЛЕТКАХ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА?

Свойства водорода таковы, что ему трудно подобрать одно, вполне определенное место. Чаще всего его помещают в первую группу, зачисляют в родственники к щелочным металлам. Как и у них, у водорода один электрон на внешней оболочке, и он может проявлять положительную валентность, равную единице. И наконец,

он способен вытеснять некоторые металлы из их солей. Но этим и ограничиваются свойства, родственные прочим элементам первой группы. Водород — неметалл, газ, а все остальные — типичные металлические элементы.

Зато у водорода много общего с галогенами— элементами седьмой группы. Как и у галогенов, молекула водорода состоит из двух атомов. И галогены и водород — типичные неметаллы. Подобно галогенам, водород может проявлять отрицательную валентность, вступая в соединения с металлами и образуя своеобразные вещества — металлические гидриды. Но и этого сходства слишком мало, чтобы считать водород кровным братом галогенов.

Поэтому ученые и считают, что водород объединяет в себе черты элементов и первой и седьмой групп. Такая «двуликость» водорода объясняется строением его атома. Любой элемент, отдавая валентные электроны, сохраняет в неприкосновенности одну или несколько предыдущих оболочек. Водород, расставаясь с единственным валентным электроном, предстает перед нами в виде «голого» атомного ядра — протона. Поэтому химия водорода— это до какой-то степени единственная в своем роде химия элементарной частицы.

## САМАЯ УДИВИТЕЛЬНАЯ ГРУППА ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА

Назовем ее сразу: это восьмая группа периодической системы. Входящие в нее элементы группируются по три в каждом большом периоде таблицы. Эти группировки называются триадами.

Элементы триад очень сходны между собой. Даже названия некоторых из них объясняются именно таким сходством. В средние века рудокопы находили иногда загадочные руды, похожие на железные, из которых никак не удавалось выплавить железо. Озадаченные рудокопы наивно думали, что над ними зло шутят горные духи — карлики кобольды и старый черт Ник. Отсюда и имена двух элементов первой триады: кобальт и никель.

Элементы двух других триад еще более похожи друг на друга; их даже объединяют общим названием: платиновые металлы. И все они встречаются в природе почти исключительно в самородном металлическом состоянии.

Восьмая группа не делится на главную и побочную, как другие группы таблицы Менделеева. Казалось бы, максимальная валентность элементов в триадах должна равняться восьми. Но таких «высот» достигают лишь рутений и осмий: им удается образовывать окислы $RuO_4$ и $OsO_4$.

Получается, что номер группы носит чисто формальный характер. И некоторые химики не без основания указывали на это как на слабое место периодической системы.

На цветной вкладке у стр. 336 изображены схемы электронных оболочек железа, кобальта и никеля. У них происходит достройка предыдущей электронной оболочки ($M$-оболочки) $d$-электронами. И эта оболочка уже близка к завершению. Точно такую же картину мы видим и в атомах платиновых металлов.

А раз предыдущая оболочка вот-вот должна заполниться до нужной емкости, то атому из восьмой группы становится невыгодным отдавать с нее много электронов. Поэтому восьмивалентное состояние большая редкость среди элементов триад.

Платиновые металлы вообще неохотно позволяют вмешиваться в свою структуру даже самым яростным химическим агрессорам, и их трудно вовлечь в соединения. Потому-то их вместе с золотом называют благородными металлами.

## БЛАГОРОДНЫЕ ГАЗЫ МОГУТ ВСТУПАТЬ В ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Ни из периодического закона, ни из теории строения атома не следует, что элементы нулевой группы — благородные газы, эти химические «ленивцы»,— вообще не способны вступать в реакции химического взаимодействия с другими элементами. Теория только указывает на исключительную прочность внешних электронных оболочек у этих «безразличных ко всему на свете» элементов: гелия, неона, аргона, криптона, ксенона и радона. Из теории вытекает лишь их высокая химическая инертность.

Это полностью соответствует их свойствам. В обычных условиях они ни с чем не соединяются. В природе они находятся в свободном состоянии. Они даже не способны образовать свою собственную молекулу. Все это одноатомные газы. Их нормальное состояние — нулевая валентность.

Когда в 1900 г. Д. И. Менделеев и У. Рамзай встретились в Лондоне, оба ученых пришли к убеждению, что к периодической системе нужно для этих бездеятельных элементов

добавить еще одну, «нулевую» группу. Такое положение в менделеевской таблице для этих элементов до сих пор общепринято. Оно хорошо характеризует их свойства.

Однако химики никогда не теряли надежду преодолеть химическую «лень» благородных газов и заставить их вступать в химические превращения. Это оказалось чрезвычайно трудной задачей. Решение ее потребовало более 60 лет напряженной самоотверженной работы.

Попытки получить химические соединения инертных газов были предприняты сразу после открытия аргона. Уже в 1896 г., всего через два года после открытия аргона, было получено при очень высоком давлении первое соединение аргона с водой: $Ar \cdot H_2O$. Но чтобы получить такие же соединения для криптона и ксенона, химикам пришлось работать еще почти 30 лет (до 1925 г.). Всего более 40 лет затратили химики на неудачные попытки заставить благородные газы вступить в реакцию еще с каким-либо веществом, помимо воды.

Первые успешные результаты в преодолении их бездеятельности получил советский химик Б. Никитин. Ему удалось заставить благородные газы вступать в реакцию с некоторыми органическими соединениями. И все же полученные им соединения нельзя было считать истинно химическим. Как было показано позднее, это были соединения без химической связи. В них атом инертного газа находился внутри органической молекулы, как в клетке, и не мог ее покинуть. Такие соединения называются теперь клатратными соединениями.

Непрерывные неудачи создали общепринятое мнение о том, что благородные газы вообще не способны участвовать в химических реакциях. И даже школьники во всем мире так это и учили по своим учебникам. Но упорная борьба продолжалась. Развивая теорию химической связи, ученые-теоретики смогли с уверенностью предсказать возможность взаимодействия некоторых инертных газов с фтором.

И, наконец, совсем недавно, в 1962 г., был достигнут замечательный успех. Канадскому химику Бартлетту удалось получить первое настоящее соединение ксенона с платиной и фтором $XePtF_6$. Вскоре были получены соединения $XeF_6$, $XeF_4$ и $XeF_2$. Это — твердые кристаллические устойчивые вещества белого цвета. Были получены и соединения криптона и фтора, но они стойки только при температуре жидкого азота. Наконец, удалось получить соединение ксенона с кислородом. Оно оказалось сильно взрывчатым.

Теперь можно считать, что химики преодолели химическую инертность элементов нулевой группы таблицы Менделеева и положили начало новому интересному разделу химии.

## СКОЛЬКО РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОДНОЙ КЛЕТКЕ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА?

В этом простом и, казалось бы, ясном вопросе отражается почти вековая история ошибок и заблуждений. Для самого Менделеева такой вопрос был просто неуместен: одну клетку в таблице может занимать только один элемент.

Много известных химиков, среди них и сам Менделеев, долго бились над размещением редкоземельных элементов в периодической системе: пытались поместить, например, церий в четвертой группе, празеодим в пятой, для неодима искали место в шестой.

Но эти необыкновенные элементы бесцеремонно нарушали самую основу периодического закона. При любых попытках разместить их в таблице периодическая повторяемость свойств не соблюдалась. В главных и побочных подгруппах должны быть сходные элементы. Церий же не имел ничего общего с цирконием, празеодим с ниобием, а неодим совершенно не был похож на молибден.

Зато, по мере того как изучались их химические свойства, становилось все более ясным, что эти элементы сходны друг с другом, как братья-близнецы. Они настолько химически подобны, что химику их и различить и разделить чрезвычайно трудно. Но все они, бесспорно, разные элементы. В этом химики не сомневались.

Друг Менделеева, чешский химик Браунер, предложил самое простое решение: поместить их **все в одну** клетку таблицы. Менделееву пришлось с этим согласиться. Но, по существу, это только увеличило принципиальную трудность проблемы, не разрешив ее.

Если **одно** место могут занимать **несколько различных** элементов, то, во-первых, нарушается основной принцип периодической системы и, во-вторых, становится совершенно невозможным предвидеть и предсказать, сколько же их можно найти в природе, сколько их вообще может существовать. Химики же всего мира разыскивали их очень усердно и более чем успешно. За короткий период, примерно за 30 лет, было «открыто» почти **сто** (!) редкоземельных элементов.

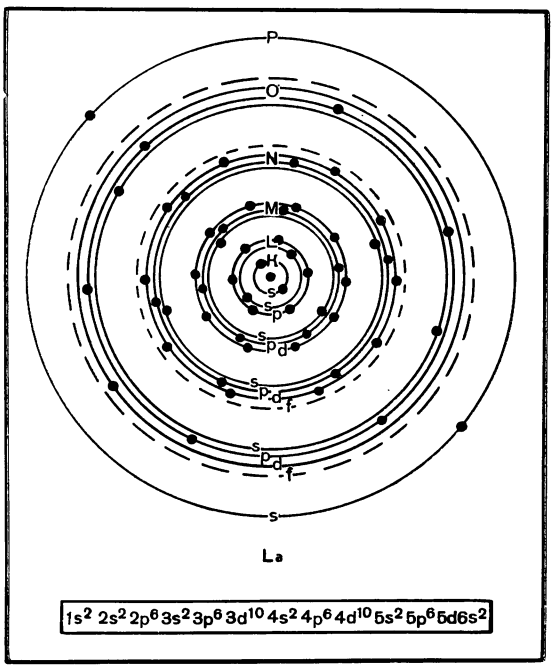



**Рис. 10. Будущему химику рекомендуем внимательно изучить эту упрощенную схему довольно сложного атома. Это атом лантана. На первый взгляд у него очень сложная формула, но это только так кажется. Обратите внимание: на всех энергетических уровнях обязательно по 2 S-электрона, по 6 *p*-электронов. В оболочках *M* и *N*, кроме этих электронов, есть еще по 10 *d*-электронов. Заметьте, что подуровень, где должны быть *f*-электроны, пустой, на нем ни одного электрона нет. Затем у лантана только один 5 *d*-электрон и, наконец, есть еще два 6 *s*-электрона. Возможный подуровень 4*f* тоже пустой. Всего у лантана, как это и должно быть, 57 электронов. Он занимает клетку 57. Это первый элемент из семейства редких земель. У последующих элементов, по мере увеличения заряда атомного ядра, электроны будут постепенно заполнять свободный, глубоко скрытый уровень 4*f*, на котором может поместиться 14 электронов. Пустой подуровень 5*f* начнет заполняться только у трансурановых элементов. Пока еще неизвестно точно, как построен последний, седьмой, период менделеевской таблицы. Поэтому химики всего мира с нетерпением ждут результаты изучения недавно открытого советскими учеными элемента 104.**

Все попытки найти разумное решение проблемы редких земель были безуспешными. Она казалась неразрешимой.

Только квантовая теория строения атома помогла решить окончательно эту большую загадку химии. Детальное изучение спектральных характеристик у редкоземельных элементов показало, что строение их атомов очень своеобразно. Все они «внешне» совершенно сходны между собой. Их наружные электронные оболочки, у всех без исключения, построены совершенно одинаково (рис. 10).

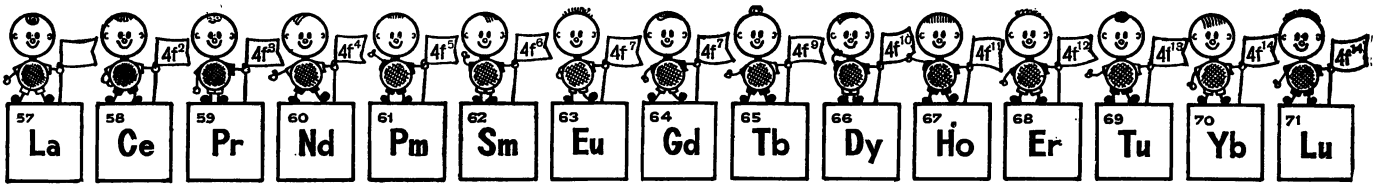
У всех у них в самой наружной *P*-оболочке по два *s*-электрона, поэтому все они — металлы. Глубже расположенный *d*-подуровень, принадлежащий к *O*-оболочке, в атомах редкоземельных элементов еще не заполнен — в нем всего лишь один электрон, который тоже может принимать участие в химических превращениях. Поэтому редкоземельные элементы преимущественно трехвалентны. Но это разные элементы, заряды их атомов различны, и потому у них должно быть различным и число электронов. Определение порядкового номера установило, сколько же всего этих элементов, а изучение спектров помогло выяснить их строение. Оказалось, что они отличаются друг от друга числом *f*-электронов на оставшейся незаполненной, глубоко скрытой в недрах атома *N*-оболочке. Эти электроны защищены снаружи «броней» устойчивой оболочки $5s^25p^6$, той самой, которая обеспечивает благородному газу ксенону (элемент 54) его свойства. Эти электроны почти совершенно блокированы и не могут проявлять себя в химических свойствах.

Правда, не все ученые с этим согласны. Многие считают, что строение редкоземельных элементов значительно сложнее: 5*d*-электрон, утверждают они, есть только у лантана, гадолиния и лютеция, у остальных лантаноидов на 4*f*-уровне на один электрон больше. Изучение лантаноидов еще не завершено до конца.

Зная теперь законы построения внешних электронных оболочек атома, любой из вас, будущих химиков, сможет сам решить проблему, над которой химики прошлого бились более 160 лет, считая с открытия первой «редкой земли»,— сколько редкоземельных элементов существует в природе.

Очевидно, ровно столько, сколько их соответствует постепенному заполнению всех орбит с этими электронами. Обозначение *f* заменяет квантовое число $l = 3$. Мы уже знаем, что таких орбит может быть $2 \times 3 + 1 = 7$. А на каждой может быть не больше двух электронов. Следовательно, таких элементов в природе может быть **четырнадцать.** Всего же в природе должно существовать ровно **пятнадцать** элементов-близнецов, считая и лантан, свойствами близкий к лантаноидам. Столько их в действительности и оказалось: начиная с 57-го — лантана до 71-го — лютеция. Правда, в природе все-таки оказался пробел: 61-го элемента найти пока не удалось. Пришлось ученым самим его изготовить. Его назвали прометием.

Итак, можно ли сказать, что в одной клетке периодической таблицы размещаются пятнадцать элементов? Этот вопрос обсуждается часто и в наши дни. Периодический закон Менделеева — это всеобщий закон природы. В естественной системе элементов каждый элемент занимает одно место, и, следовательно, в табли-




**Дружное семейство пятнадцати элементов-близнецов. Внешне они друг от друга почти ничем не отличаются.**

це каждый элемент — одну клетку. Менделеев придал своей таблице самую простую и удобную форму. Изображать же ее можно по-разному. Можно просто помнить, что одна клетка между барием и гафнием условно заменяет сразу 15 клеток. Но можно менделеевскую таблицу начертить так, чтобы все длинные периоды оказались развернутыми. Периодический закон от этого не изменится и не пострадает.

## КАК БЫЛИ ПРЕДСКАЗАНЫ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТА № 72

Если теория объясняет — делает ясным то, что долго было непонятным и загадочным, это, конечно, ее несомненное достоинство. Впрочем, пожалуй, иначе ее и нельзя было бы назвать теорией. Но главное, на чем испытывается истинность теоретических представлений, — это способность теории предвидеть, предсказывать неизвестное.

Величайшим историческим примером этого должна быть, конечно, признана сама теория о существовании периодичности свойств химических элементов. В ней, как в зародыше, были заложены все великие открытия науки о веществе и его строении, достигнутые человечеством за последующее столетие.

Одним из больших достижений физики может быть названа и теория строения атома и его электронных оболочек. Созданная на основе менделеевской таблицы, эта теория сделала ясным очень многое из загадочного и непонятного в свойствах вещества. Но этого мало. Истинность наших теоретических представлений о строении атома наиболее полно раскрывается в том, что на их основе ученым удалось предска-

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

**Даже в наше время ежегодно во всем мире публикуется не менее десятка вариантов периодической системы. Многие из них имеют непривычную для нас форму. Вот, например, в каком виде предстает периодическая система, приведенная в одном американском журнале. Все длинные периоды в ней развернуты. Лютеций исключен из семейства лантаноидов и помещен вместо лантана в третью группу как непосредственный аналог скандия и иттрия. Но, не правда ли, таблица потеряла свою наглядность и удобство?**

| ПЕРИОД | ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕРИОДЕ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | H 1 | | | | | | | | | | | | | | | | He 2 |
| 2 | 8 | Li 3 | Be 4 | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | Ne 10 | | | | | | | | | |
| 3 | 8 | Na 11 | Mg 12 | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | Ar 18 | | | | | | | | | |
| 4 | 18 | K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | Kr 36 |
| 5 | 18 | Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | J 53 | Xe 54 |
| 6 | 32 | Cs 55 | Ba 56 | Lu 71 | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | Rn 86 |
| 7 | | Fr 87 | Ra 88 | | | | | | | | | | | | | | | |

ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ЛАНТАНОИДЫ

| La 57 | Ce 58 | Pr 59 | Nd 60 | Pm 61 | Sm 62 | Eu 63 | Gd 64 | Tb 65 | Dy 66 | Ho 67 | Er 68 | Tu 69 | Yb 70 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

АКТИНОИДЫ

| Ac 89 | Th 90 | Pa 91 | U 92 | Np 93 | Pu 94 | Am 95 | Cm 96 | Bk 97 | Cf 98 | Es 99 | Fm 100 | Md 101 | – 102 | Lw 103 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

зать многое, чего наука еще не знала. В качестве примера можно указать на очень интересную историю элемента № 72.

Его существование было предсказано Менделеевым еще в 1869 г. Но до 1922 г., несмотря на многочисленные поиски, отыскать его в природе химики не могли. Как это ни странно, оказалось, что поискам мешали соседи по таблице Менделеева — редкоземельные элементы. До создания теории строения атома никто не знал, на каком из элементов должна заканчиваться группа редких земель. Многие химики, считая, что к ним должен относиться и элемент № 72, безуспешно пытались его искать в природе там, где его быть не может.

После того как теория строения атома показала, что группа редкоземельных элементов должна заканчиваться на элементе № 71 — на лютеции, стало очевидным, что 72-й элемент не может относиться к лантаноидам и должен быть похожим на цирконий. Это конкретное предсказание свойств еще не найденного элемента вытекало из квантовой теории строения атома. Оно и помогло отыскать в природе неуловимый до того элемент № 72. В 1922 г. он был обнаружен в циркониевых рудах и назван гафнием.

## ПОСЛЕДНИЙ ПЕРИОД ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА

Пожалуй, больше всего загадок в современной менделеевской таблице приходится на ее последний, седьмой, период. Этот период особый. Его начала создавать природа, а завершать пришлось человеку. Все элементы седьмого периода радиоактивны. Стабильных в нем нет. Интересно, что во времена Менделеева вообще химикам не было известно ни одного элемента, подходящего своими свойствами для седьмого периода. Этот период был целиком предсказан Менделеевым. Он начинается с экацезия (№ 87), затем идут экабарий (№ 88) и экалантан (№ 89), для тория и урана Менделеев предсказал правильные атомные веса. Между ними он оставил место для экатантала (№ 91). Уверенность великого ученого в истинности открытого им закона была так велика, что он даже предусмотрел в таблице пять мест для элементов тяжелее урана. Эти места теперь занимают трансураны — искусственно созданные человеком элементы. Но теперь их известно уже 12. Последний — 104-й.

Как же построен седьмой период? На этот очень важный для химии вопрос теория пока еще не может дать ответ. Его можно выяснить, только изучая оптические и химические свойства элементов.

Большинство исследователей в настоящее время придерживается мнения, что седьмой период менделеевской системы сходен с предыдущим — шестым. В нем снова повторяется постепенное заполнение *f*-электронами орбит, глубоко расположенных в третьей, считая снаружи, *O*-оболочке. В нем поэтому тоже должна быть группа из пятнадцати элементов-близнецов, сходных между собой и со своими собратьями из шестого периода — лантаноидами. Так и принято теперь изображать седьмой период менделеевской таблицы. В нем элементы с № 89 и по № 103 выделяются в обособленную группу актиноидов.

Однако в современном построении таблицы все еще остаются следы сомнений и неуверенности ученых. Очень сложными и запутанными оказались химические свойства актиноидов. Первые из них: актиний, торий, протактиний и уран — тяготеют химическими свойствами к местам, отведенным для них еще Менделеевым. Зато последние из них — трансураны, по-видимому, ведут себя в точности как их собратья по предыдущему периоду — лантаноиды. Это замечательное сходство и помогло ученым в их сложной работе: в создании новых для таблицы элементов — в синтезе трансуранов.

## ЭЛЕМЕНТЫ, СОЗДАННЫЕ ЧЕЛОВЕКОМ, ТАКЖЕ ПОДЧИНЯЮТСЯ ВЕЛИКОМУ ЗАКОНУ

Четыре места в периодической таблице оставались пустыми особенно долго. Это были клетки № 43, 61, 85 и 87. Из четырех элементов, которые должны были бы занять эти места, три были уже давно предсказаны Менделеевым: экамарганец —43, экайод —85 и экацезий —87. Четвертый — № 61 — должен был оказаться редкоземельным элементом.

Эти четыре элемента были неуловимы. Усилия ученых всех стран мира, направленные на их поиски в природе, оставались безуспешными. С помощью периодического закона давно уже были заполнены все остальные места в таблице Менделеева — от водорода до урана.

Не один раз в научных журналах появлялись сообщения об открытии этих четырех элементов. Экамарганец «открывали» в Японии, где ему дали имя «нипонний», в Германии — под названием «мазурий». Элемент № 61 «открывали» в разных странах, по крайней мере

# Такую периодическую таблицу совсем еще недавно изучали в школах ваши родители

| Периоды | Ряды | Семейства | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
| | | Побочная группа / Главная группа | Побочная группа / Главная группа | Побочная группа / Главная группа | Побочная группа / Главная группа | Побочная группа / Главная группа | Побочная группа / Главная группа | Побочная группа / Главная группа | Побочная группа / Главная (нулевая) группа |
| | 1 | | | | | | | | 1 H Водород 1,0078 / 2 He Гелий 4,002 |
| 1-й малый | 2 | 3 Li Литий 6,940 | 4 Be Бериллий 9,02 | 5 B Бор 10,82 | 6 C Углерод 12,00 | 7 N Азот 14,008 | 8 O Кислород 16,0000 | 9 F Фтор 19,000 | 10 Ne Неон 20,183 |
| 2-й малый | 3 | 11Na Натрий 22,997 | 12 Mg Магний 24,32 | 13 Al Алюминий 26,97 | 14 Si Кремний 28,06 | 15 P Фосфор 31,02 | 16 S Сера 32,06 | 17 Cl Хлор 35,457 | 18 Ar Аргон 39,944 |
| 1-й большой | 4 | 19 K Калий 39,096 | 20 Ca Кальций 40,08 | 21 Sc Скандий 45,10 | 22 Ti Титан 47,90 | 23 V Ванадий 50,95 | 24 Cr Хром 52,01 | 25 Mn Марганец 54,93 | 26 Fe Железо 55,84 / 27 Co Кобальт 58,94 / 28 Ni Никель 58,69 |
| | 5 | 29 Cu Медь 63,57 | 30 Zn Цинк 65,38 | 31 Ga Галлий 69,72 | 32 Ge Германий 72,60 | 33 As Мышьяк 74,91 | 34 Se Селен 78,96 | 35 Br Бром 79,916 | 36 Kr Криптон 83,7 |
| 2-й большой | 6 | 37 Rb Рубидий 85,44 | 38 Sr Строций 87,63 | 39 Y Иттрий 88,92 | 40 Zr Цирконий 91,22 | 41 Nb Ниобий 93,3 | 42 Mo Молибден 96,0 | 43 Ma Мазурий (?) | 44 Ru Рутений 101,7 / 45 Rh Родий 102,91 / 46 Pd Палладий 106,7 |
| | 7 | 47 Ag Серебро 107,880 | 48 Cd Кадмий 112,41 | 49 In Индий 114,76 | 50 Sn Олово 118,70 | 51 Sb Сурьма 121,76 | 52 Te Теллур 127,61 | 53 J Йод 126,92 | 54 Xe Ксенон 131,3 |
| 3-й большой | 8 | 55 Cs Цезий 132,91 | 56 Ba Барий 137,36 | 57 La Лантан 138,92 | 72 Hf Гафний 178,6 | 73 Ta Тантал 181,4 | 74 W Вольфрам 184,0 | 75 Re Рений 186,31 | 76 Os Осмий 191,5 / 77 Ir Иридий 193,1 / 78 Pt Платина 195,23 |
| | 9 | 79 Au Золото 197,2 | 80 Hg Ртуть 200,61 | 81 Tl Таллий 204,39 | 82 Pb Свинец 207,22 | 83 Bi Висмут 209,00 | 84 Po Полоний 210,0 | 85 Am Алабамий ? | 86 Nt Нитон (эманация) (222) |
| 4-й большой | 10 | 87 Vi Виргиний ? | 88 Ra Радий 225,97 | 89 Ac Актиний (227) | 90 Th Торий 232,12 | 91 Pa Протактиний (231) | 92 U Уран 238,14 | | |

Лантаниды: 58 Ce Церий 140,13 / 59 Pr Празеодимий 140,92 / 60 Nd Неодимий 144,27 / 61 Il Иллиний ? / 62 Sm Самарий 150,43 / 63 Eu Европий 152,0 / 64 Gd Гадолиний 157,3 / 65 Tb Тербий 159,2 / 66 Dy Диспрозий 162,46 / 67 Ho Гольмий 163,5 / 68 Er Эрбий 167,64 / 69 Tu Туллий 169,4 / 70 Yb Иттербий 173,04 / 71 Cp Кассиопий 175,0

Слева у каждого элемента обозначено порядковое число, внизу атомный вес данного элемента (атомные веса исправлены по данным Комиссии атомных весов Интернационального союза химии на 1934 г.).

В периодической таблице Менделеева, помещенной в 1940 г. в 45-м томе первого издания Большой советской энциклопедии, на месте экацезия в клетке № 87 было напечатано название «виргиний», на месте экамарганца в клетке № 43 — «мазурий», там, где должен находиться элемент № 85 — экайод, было название «алабамий», среди редкоземельных элементов 61-е место было занято элементом со звучным именем — «иллиний». Но все эти красивые имена были порождены только ошибками исследователей. Разрабатывая новые методы анализа, они, ошибаясь сами, прокладывали новые пути тем, кто находил правильную дорогу к истине. Эти последние заблуждения великой разведки в природе. Поиски учеными предсказанных Менделеевым элементов для последних пустых мест в периодической таблице были безнадежны. В природе элементы № 43, 61 и 85 обнаружить было чрезвычайно трудно, так как их очень мало. Эти элементы уже потом были созданы искусственно. Только в самое последнее время сверхточные методы анализа позволили обнаружить в природе исчезающе малые следы элементов 43 и 85.

трижды, он получал имена «иллиний», «флоренций», «циклоний». Экайод «находили» в природе также неоднократно. Ему давали имена «алабамий», «гельвеций». Экацезий в свою очередь получал названия «виргиний», «молдавий». Некоторые из этих названий попадали в периодические таблицы в различных справочниках и даже проникли в школьные учебники. Но все эти открытия не подтвердились: каждый раз точная проверка показывала, что была допущена ошибка и случайные ничтожные примеси были приняты за новый элемент.

Долгие и трудные поиски привели, наконец, к открытию в природе одного из неуловимых элементов. Оказалось, что экацезий, который должен занимать в периодической таблице 87-е место, возникает в цепочке распада природного радиоактивного изотопа — урана-235. Это короткоживущий радиоактивный элемент. У него нет стабильных изотопов. Он получил имя «франций».

Элементы № 43, 61 и 85 оставались неуловимыми. В природе их никак не удавалось найти, хотя ученые уже владели могучим методом, безошибочно указывающим путь для поиска новых элементов,— периодическим законом. Все химические свойства неизвестного элемента благодаря этому закону известны ученым заранее.

Так почему же были безуспешны поиски этих трех элементов в природе? Может быть, не для всех элементов оказался справедливым закон Менделеева и поиски их в природе направлялись по неверному пути?

Изучая свойства атомных ядер, физики доказали: у элементов с атомными номерами 43, 61, 85 и 87 не могут существовать стабильные изотопы. Они могут быть только радиоактивными, с короткими периодами полураспада и должны быстро исчезать. Поэтому все эти элементы были созданы человеком искусственно.

Пути для создания новых элементов были указаны периодическим законом. Попробуем с его помощью сами наметить путь синтеза экамарганца. Этот элемент № 43 был первым элементом, созданным человеком искусственно.

Мы знаем, что химические свойства элемента определяются его электронной оболочкой, а она зависит от заряда атомного ядра. В ядре элемента № 43 должно быть 43 положительных заряда, и вокруг ядра должны вращаться 43 электрона. Как же можно создать элемент с 43 зарядами в атомном ядре? Как можно доказать, что такой элемент создан?

Давайте рассмотрим внимательно, какие соседи в периодической таблице у пустого места, предназначенного для элемента № 43. Оно находится почти в середине пятого периода. Этот период длинный, так же как четвертый и шестой периоды. На соответствующих местах в четвертом периоде стоит марганец, а в шестом — рений. Поэтому химические свойства 43-го элемента должны быть похожи на свойства марганца и рения. Недаром Д. И. Менделеев, предсказавший этот элемент, назвал его экамарганцем. Слева от 43-го места находится молибден, занимающий клетку 42, справа, в 44-й,—рутений. Следовательно, можно предположить: чтобы создать элемент № 43, нужно повысить число зарядов в ядре атома, имеющего 42 заряда, еще на один элементарный заряд. Поэтому, исходя из указаний периодического закона, при создании нового элемента № 43 нужно взять в качестве исходного сырья молибден. У него в ядре как раз 42 заряда. Одним положительным зарядом обладает самый легкий элемент — водород. Следовательно, можно ожидать, что элемент № 43 может быть получен в результате ядерной реакции между молибденом и водородом (рис. 11).

*Таблица к статье «Великий закон»*

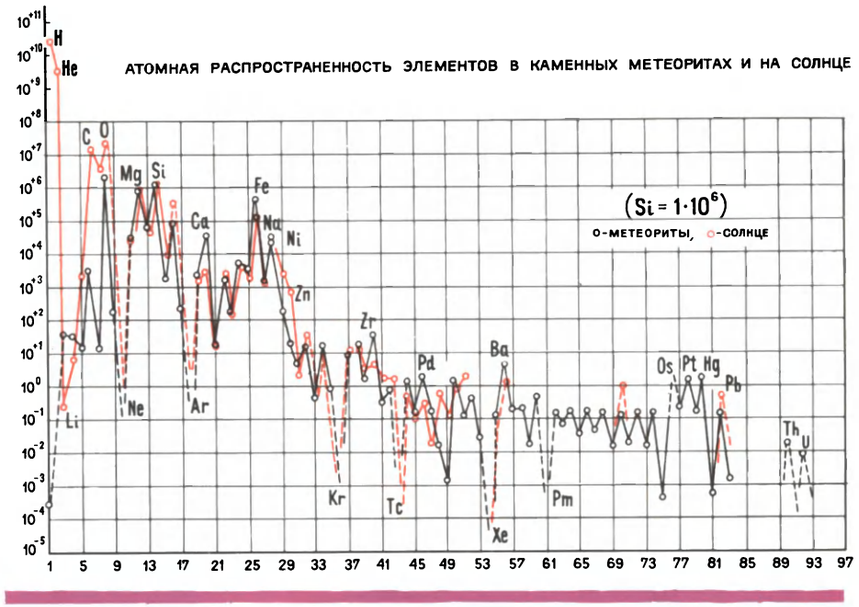
**До Менделеева ничего не было известно об элементах, занимающих теперь в периодической таблице порядковые номера 2, 10, 18, 21, 31, 32, 36, 43, 54, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66,67,69,70, 71, 72, 75, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104. Одни из них еще не были открыты, другие вовсе не существовали. Достаточно хорошо были изучены только 54 элемента, но правильные значения атомного веса были известны лишь для 49 элементов (они обозначены в таблице *красным* цветом). Для элементов 22, 52, 76, 77, 79 Менделеев исправил на основании их положения в таблице неточно установленные атомные веса. Не производя никаких измерений, он предсказал новые верные значения атомного веса для элементов 4, 39, 49, 57, 58, 59, 68, 90, 92 (все эти элементы помечены *желтым* цветом). Элементы 59 и 60 во времена Менделеева принимали за один элемент, для которого он и предсказал правильное значение среднего атомного веса. Отделить эти два элемента друг от друга удалось значительно позже. Менделеев предсказал существование двенадцати новых, до него никому не известных элементов. Для трех из них он даже указал все важнейшие физические и химические свойства не только самих элементов, но и некоторых их соединений. Это были элементы 21, 31 и 32 (*голубой* цвет). Кроме этих элементов, Менделеев предсказал элементы 43, 72, 75, 84, 85, 87, 88, 89, 91 (*сиреневые* клетки). По примеру Менделеева, на основании его закона были предсказаны элементы 10, 36, 54, 86 (отмечены *палевым* цветом). Все эти шестнадцать, предсказанных заранее элементов позднее были обнаружены в природе. Кроме них, тоже после открытия периодического закона, были найдены элементы 2, 18, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 67,69, 70, 71 (*серый* цвет). Элементы 43, 61, 85 долгое время найти в природе не удавалось. Они были созданы сначала человеком. Элементы 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104 лежат за пределами таблицы, существовавшей при жизни Менделеева. Их тоже не было на Земле, все они созданы искусственно, и пути для их синтеза указаны периодическим законом (эти элементы помечены *оранжевым* цветом). Элементы 43, 85 и 87 помечены на таблице двумя цветами. Это — искусственно полученные элементы, существование которых было предсказано Менделеевым. Элемент 104 еще не нашел себе место в таблице Менделеева. Химики еще не завершили его изучение.**

| ПЕРИОДЫ | РЯДЫ | ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | |
| 1 | I | 1 H ВОДОРОД 1,00797 | | | | | | (H) | | 2 He ГЕЛИЙ 4,003 |
| 2 | II | 3 Li ЛИТИЙ 6,939 | 4 Be БЕРИЛЛИЙ 9,012 | 5 B БОР 10,811 | 6 C УГЛЕРОД 12,01115 | 7 N АЗОТ 14,007 | 8 O КИСЛОРОД 15,9994 | 9 F ФТОР 18,998 | | 10 Ne НЕОН 20,183 |
| 3 | III | 11 Na НАТРИЙ 22,99 | 12 Mg МАГНИЙ 24,312 | 13 Al АЛЮМИНИЙ 26,982 | 14 Si КРЕМНИЙ 28,086 | 15 P ФОСФОР 30,974 | 16 S СЕРА 32,064 | 17 Cl ХЛОР 35,453 | | 18 Ar АРГОН 39,948 |
| 4 | IV | 19 K КАЛИЙ 39,102 | 20 Ca КАЛЬЦИЙ 40,08 | 21 Sc СКАНДИЙ 44,96 | 22 Ti ТИТАН 47,9 | 23 V ВАНАДИЙ 50,94 | 24 Cr ХРОМ 51,996 | 25 Mn МАРГАНЕЦ 54,94 | 26 Fe ЖЕЛЕЗО 55,847 | 27 Co КОБАЛЬТ 58,933 |
| | V | 29 Cu МЕДЬ 63,54 | 30 Zn ЦИНК 65,37 | 31 Ga ГАЛЛИЙ 69,72 | 32 Ge ГЕРМАНИЙ 72,59 | 33 As МЫШЬЯК 74,921 | 34 Se СЕЛЕН 78,96 | 35 Br БРОМ 79,91 | | 36 Kr КРИПТОН 83,80 |
| 5 | VI | 37 Rb РУБИДИЙ 85,47 | 38 Sr СТРОНЦИЙ 87,62 | 39 Y ИТТРИЙ 88,91 | 40 Zr ЦИРКОНИЙ 91,22 | 41 Nb НИОБИЙ 92,91 | 42 Mo МОЛИБДЕН 95,94 | 43 Tc ТЕХНЕЦИЙ (99) | 44 Ru РУТЕНИЙ 101,07 | 45 Rh РОДИЙ 102,91 |
| | VII | 47 Ag СЕРЕБРО 107,87 | 48 Cd КАДМИЙ 112,4 | 49 In ИНДИЙ 114,82 | 50 Sn ОЛОВО 118,69 | 51 Sb СУРЬМА 121,75 | 52 Te ТЕЛЛУР 127,6 | 53 J ИОД 126,904 | | 54 Xe КСЕНОН 131,3 |
| 6 | VIII | 55 Cs ЦЕЗИЙ 132,905 | 56 Ba БАРИЙ 137,34 | 57–71 ЛАНТАНОИДЫ | 72 Hf ГАФНИЙ 178,49 | 73 Ta ТАНТАЛ 180,948 | 74 W ВОЛЬФРАМ 183,85 | 75 Re РЕНИЙ 186,2 | 76 Os ОСМИЙ 190,2 | 77 Ir ИРИДИЙ 192,2 |
| | IX | 79 Au ЗОЛОТО 196,967 | 80 Hg РТУТЬ 200,59 | 81 Tl ТАЛЛИЙ 204,37 | 82 Pb СВИНЕЦ 207,19 | 83 Bi ВИСМУТ 208,98 | 84 Po ПОЛОНИЙ (210) | 85 At АСТАТ (210) | | 86 Rn РАДОН (222) |
| 7 | X | 87 Fr ФРАНЦИЙ (223) | 88 Ra РАДИЙ 226,03 | 89–103 АКТИНОИДЫ | (Th) | (Pa) | (U) | | | |

| ЛАНТАНОИДЫ | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 57 La ЛАНТАН 138,91 | 58 Ce ЦЕРИЙ 140,12 | 59 Pr ПРАЗЕОДИМ 140,907 | 60 Nd НЕОДИМ 144,24 | 61 Pm ПРОМЕТИЙ (147) | 62 Sm САМАРИЙ 150,35 | 63 Eu ЕВРОПИЙ 151,96 | 64 Gd ГАДОЛИНИЙ 157,25 | 65 Tb ТЕРБИЙ 158,924 | 66 Dy ДИСПРОЗИЙ 162,51 | 67 Ho ГОЛЬМИЙ 164,93 | 68 Er ЭРБИЙ 167,26 | 69 Tu ТУЛИЙ 168,934 | 70 Yb ИТТЕРБИЙ 173,04 | 71 Lu ЛЮТЕЦИЙ 174,97 |
| **АКТИНОИДЫ** | | | | | | | | | | | | | | |
| 89 Ac АКТИНИЙ (227) | 90 Th ТОРИЙ 232,038 | 91 Pa ПРОТАКТИНИЙ (231) | 92 U УРАН 238,03 | 93 Np НЕПТУНИЙ (237) | 94 Pu ПЛУТОНИЙ (242) | 95 Am АМЕРИЦИЙ (243) | 96 Cm КЮРИЙ (247) | 97 Bk БЕРКЛИЙ (247) | 98 Cf КАЛИФОРНИЙ (249) | 99 Es ЭЙНШТЕЙНИЙ (254) | 100 Fm ФЕРМИЙ (253) | 101 Md МЕНДЕЛЕВИЙ (256) | 102 102 (254) | 103 Lw ЛОУРЕНСИЙ (257) |

104 (104)

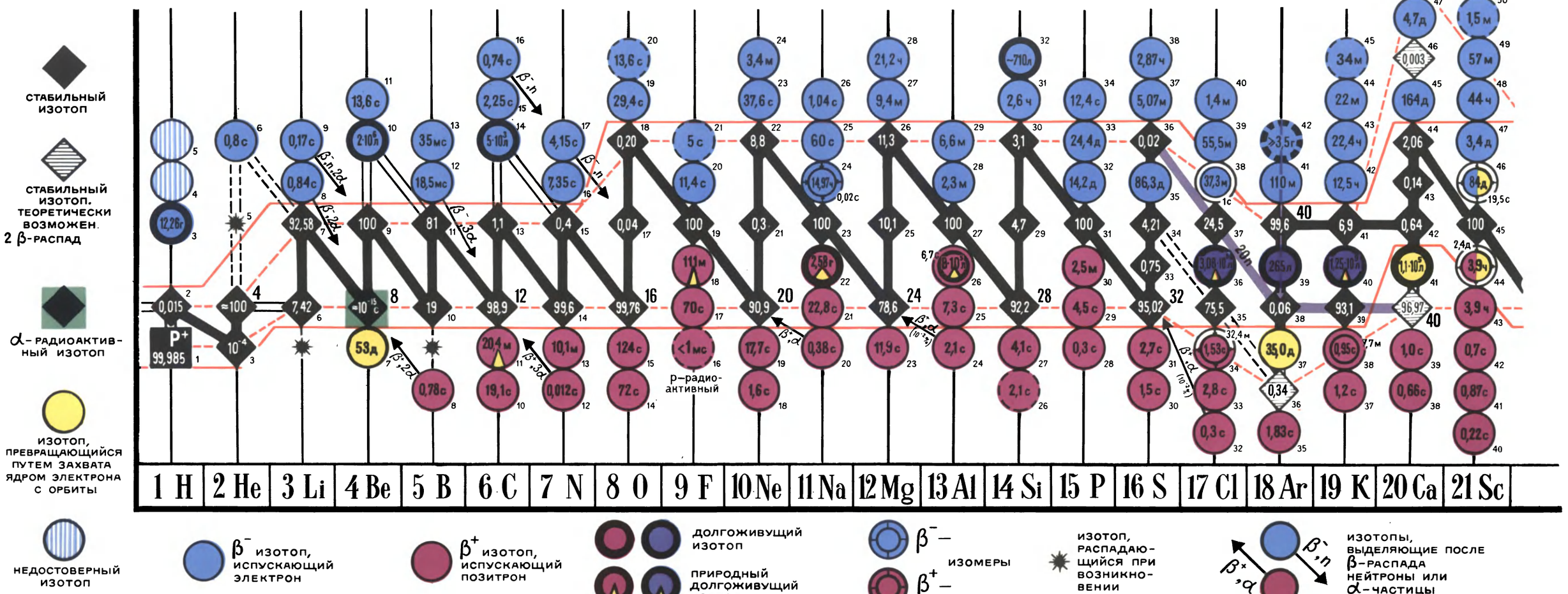
## АТОМНАЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В КАМЕННЫХ МЕТЕОРИТАХ И НА СОЛНЦЕ




## ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН ХИМИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

| ПЕРИОДЫ | РЯДЫ | ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | | | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | I | H 1 | | | | | | (H) | | | | He 2 |
| 2 | II | Li 3 | Be 4 | B 5 | C 6 | N 7 | O 8 | F 9 | | | | Ne 10 |
| 3 | III | Na 11 | Mg 12 | Al 13 | Si 14 | P 15 | S 16 | Cl 17 | | | | Ar 18 |
| 4 | IV | K 19 | Ca 20 | Sc 21 | Ti 22 | V 23 | Cr 24 | Mn 25 | Fe 26 | Co 27 | Ni 28 | |
| | V | Cu 29 | Zn 30 | Ga 31 | Ge 32 | As 33 | Se 34 | Br 35 | | | | Kr 36 |
| 5 | VI | Rb 37 | Sr 38 | Y 39 | Zr 40 | Nb 41 | Mo 42 | Tc 43 | Ru 44 | Rh 45 | Pd 46 | |
| | VII | Ag 47 | Cd 48 | In 49 | Sn 50 | Sb 51 | Te 52 | J 53 | | | | Xe 54 |
| 6 | VIII | Cs 55 | Ba 56 | La* 57 | Hf 72 | Ta 73 | W 74 | Re 75 | Os 76 | Ir 77 | Pt 78 | |
| | IX | Au 79 | Hg 80 | Tl 81 | Pb 82 | Bi 83 | Po 84 | At 85 | | | | Rn 86 |
| 7 | X | Fr 87 | Ra 88 | Ac** 89 | (Th) | (Pa) | (U) | | | | | |

## НАЧАЛО ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ АТОМНЫХ ЯДЕР




СТАБИЛЬНЫЙ ИЗОТОП

СТАБИЛЬНЫЙ ИЗОТОП. ТЕОРЕТИЧЕСКИ ВОЗМОЖЕН 2 β-РАСПАД

α-РАДИОАКТИВНЫЙ ИЗОТОП

ИЗОТОП, ПРЕВРАЩАЮЩИЙСЯ ПУТЕМ ЗАХВАТА ЯДРОМ ЭЛЕКТРОНА С ОРБИТЫ

НЕДОСТОВЕРНЫЙ ИЗОТОП

β⁻ ИЗОТОП, ИСПУСКАЮЩИЙ ЭЛЕКТРОН

β⁺ ИЗОТОП, ИСПУСКАЮЩИЙ ПОЗИТРОН

ДОЛГОЖИВУЩИЙ ИЗОТОП

ПРИРОДНЫЙ ДОЛГОЖИВУЩИЙ ИЗОТОП

β⁻ — β⁺ — ИЗОМЕРЫ

ИЗОТОП, РАСПАДАЮЩИЙСЯ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ

ИЗОТОПЫ, ВЫДЕЛЯЮЩИЕ ПОСЛЕ β-РАСПАДА НЕЙТРОНЫ ИЛИ α-ЧАСТИЦЫ

*Таблица к статье «Великий закон»*

Все три таблицы на этой цветной вкладке очень важны и интересны. Их стоит внимательно изучить. Наиболее замечательна, конечно, периодическая таблица атомных ядер. Здесь, правда, приведено только ее начало — от водорода до скандия. Полностью, к сожалению, поместить ее нельзя: уж очень она велика. Конечно, нужно немало знать, чтобы свободно читать эту удивительную таблицу и пользоваться ею. Некоторым она может показаться непонятной, и многое в ней останется неясным. Этим читателям следует вернуться к ней еще не раз, подготовившись хорошенько.

Содержание таблицы очень глубоко и обширно. Из нее можно узнать, сколько различных изотопов существует у любого элемента, какие они и каковы их свойства. Но самое главное в таблице — это отчетливое проявление периодических закономерностей в свойствах атомных ядер. Наиболее важные обозначения разъяснены в самой таблице. Правда, не все. Догадливый читатель сам сообразит, что обозначают некоторые из них, а о других пусть постарается узнать самостоятельно. Присмотритесь к таблице. На ней нанесены *все* известные в настоящее время атомные ядра — все изотопы 21 элемента в начале таблицы Менделеева. Их очень много — более 150. Большинство из них радиоактивны, неустойчивы; стабильных сравнительно немного — всего 47. Химические свойства любого изотопа каждый химик легко определит по символу элемента — все типы его атомных ядер расположены в одном столбце. Массовое число каждого ядра помечено сбоку справа от обозначения изотопа. Порядковый номер элемента, как и полагается, находится рядом с его химическим символом. Сколько нейтронов содержит ядро данного изотопа — сосчитайте сами.

Очень легко узнать: стабилен данный изотоп или нет, можно ли его обнаружить в природе, каково его относительное содержание. На это указывают цифры внутри ромбиков, они обозначают изотопный состав природного элемента, выраженный в процентах. Нетрудно узнать и радиоактивные свойства любого изотопа. Цвет кружка показывает, какой у этого изотопа тип распада. Период полураспада указан внутри кружка. Одни атомные ядра живут очень долго — иногда даже сотни тысяч лет (*л*), другие исчезают через несколько дней (*д*), часов (*ч*), минут (*м*), секунд (*с*), а есть даже и такие, что существуют всего лишь несколько миллисекунд (*мс*). Ломаная черная линия соединяет устойчивые ядра. Тонкие красные линии проведены по устойчивым четным ядрам, они ограничивают область устойчивости. Лиловый участок линии стабильности отмечает область магического числа «20».

Сложное строение таблицы отражает, как сложен мир атомного ядра. В нем пока еще не все ясно и самим физикам. Это периодическая таблица будущего. Над ней сейчас много работают ученые. Она еще не завершена. Будут еще открыты и созданы новые атомные ядра, новые изотопы и выявлены новые закономерности.

Обязательно нужно сравнить с периодической таблицей изотопов таблицу распространенности элементов на Солнце и в метеоритах (*вверху слева*). Обратите внимание на их удивительное сходство. Периодические свойства атомных ядер, и прежде всего чередование свойств четных и нечетных элементов, отражаются и на закономерностях распространения элементов во Вселенной. Замечательно также поразительное сходство между составом Солнца и метеоритов. За исключением начального участка, где находятся водород и гелий, кривые распространенности почти совпадают.

*Правая верхняя таблица* показывает связь между положением элемента в периодической таблице Менделеева и его геохимическими свойствами. *Синей* краской указаны элементы, встречающиеся преимущественно в атмосфере, *фиолетовой* краской — элементы, встречающиеся в самородном состоянии, *зеленой* — образующие рудные месторождения; *серым* цветом обозначены элементы, входящие преимущественно в состав силикатных пород. *Желтым* цветом обозначены искусственные и радиоактивные элементы. Эта упрощенная геохимическая таблица показывает, что грандиозные геохимические процессы, миллионы лет протекающие в земной коре, управляются великим периодическим законом.

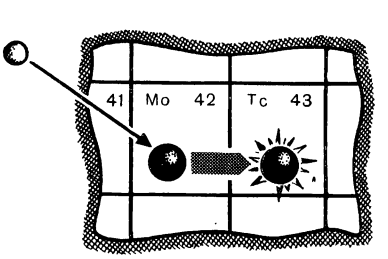



Рис. 11.

Свойства элемента № 43 должны быть сходными с химическими свойствами марганца и рения, и, для того чтобы обнаружить и доказать образование этого элемента, нужно воспользоваться химическими реакциями, аналогичными тем, с помощью которых химики определяют присутствие малых количеств марганца и рения.

Вот каким образом периодическая таблица дает возможность наметить путь для создания искусственного элемента, если, конечно, химический элемент, созданный заново человеком, будет также подчиняться закону Менделеева.

Точно таким же путем, который мы только что наметили, путем, полностью указанным периодическим законом Менделеева, и был создан в 1937 г. первый искусственный химический элемент. Он получил знаменательное имя: **технеций** — первый элемент, изготовленный техническим, искусственным путем.

Вот как был осуществлен синтез технеция. Пластинка молибдена подвергалась интенсивной бомбардировке ядрами тяжелого изотопа водорода — дейтерия, которые были разогнаны в циклотроне до огромной скорости.

Ядра тяжелого водорода, получившие очень большую энергию, проникли в ядра молибдена. После облучения в циклотроне пластинка молибдена была растворена в кислоте. Из раствора было выделено с помощью тех же реакций, которые необходимы для аналитического определения марганца (аналог элемента № 43), ничтожное количество, как говорят химики, следы, нового радиоактивного вещества. Это и был новый элемент — технеций. Он образовался при ядерной реакции между молибденом и тяжелым водородом. Вскоре были подробно изучены его химические свойства.

Так же как и природные элементы, технеций подчиняется великому закону природы — периодическому закону Менделеева. Все его свойства точно соответствуют положению элемента в менделеевской таблице.

С того времени, как был создан технеций, прошло немало лет. Теперь технеций стал

вполне доступным: он образуется в довольно большом количестве в атомных реакторах. Технеций очень хорошо изучен, получен даже его спектр. Вновь созданный элемент уже практически используется. Технеций применяется для решения имеющей огромную важность задачи. С его помощью исследуют процесс коррозии металлов. Он помогает ученым найти пути и способы сохранить одно из основных богатств человечества — железо (железные конструкции и изделия, машины) от разрушения, от ржавчины.

Метод, каким был создан 61-й элемент, очень похож на метод, которым получают технеций. Элемент № 61 должен был встать среди редкоземельных элементов: 61-я клетка находится между неодимом (№ 60) и самарием (№ 62). Новый элемент впервые был получен в 1938 г. в циклотроне бомбардировкой неодима ядрами дейтерия (рис. 12). Химическим путем 61-й элемент был выделен лишь в 1945 г. из осколочных элементов, образующихся в ядерном реакторе.

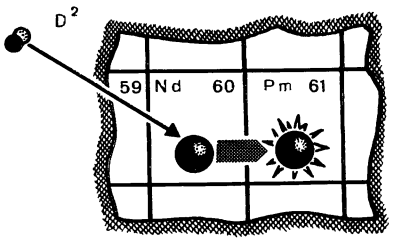



Рис. 12.

Новый элемент получил символическое имя **проме́тий**. Это имя было дано ему неспроста. Древнегреческий миф рассказывает о том, что титан Прометей похитил с неба огонь и передал его людям. За это он был наказан богами: его приковали к скале, и громадный орел ежедневно терзал его. Название «прометий» не только символизирует драматический путь похищения наукой у природы энергии ядерного деления и овладения этой энергией, но и предостерегает людей от страшной военной опасности в образе стервятника, угрожающего человечеству — Прометею.

Прометий теперь уже получают в большом количестве, и он нашел неплохое практическое применение: из него делают атомные батарейки — источники постоянного тока, способные действовать без перерыва несколько лет.

Аналогичным путем был синтезирован и самый тяжелый галоген экайод — элемент № 85. Он впервые был получен бомбардировкой висмута (№ 83) ядрами гелия (№ 2), ускоренными в циклотроне до больших энергий (рис. 13).

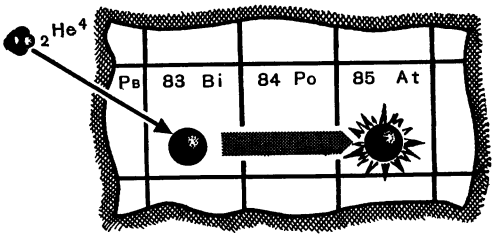



**Рис. 13. Синтез астата. Только на основании периодического закона физики могли заранее знать, что получить отсутствовавший в природе последний галоид — элемент № 85 (экайод) можно из висмута — № 83, применив быстрые ядра гелия.**

Ядра гелия, второго элемента в периодической системе, обладают двумя зарядами. Поэтому, чтобы создать 85-й элемент, и был взят висмут — 83-й элемент. Новый элемент назван **астатом**, что означает «неустойчивый». Он радиоактивен, быстро исчезает. Его химические свойства также оказались точно соответствующими периодическому закону. Он похож на йод. (О том, как нашли технеций, франций и астат в земных минералах, см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов».)

## КАК БЫЛИ ОТКРЫТЫ ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Вопрос о границах периодической системы, пожалуй, наиболее сложен. Сколько элементов существует в природе? Сколько их может быть создано человеком?

В пределах от водорода до урана их ровно 92 — ни больше, ни меньше. Это доказано периодическим законом. До водорода нет ни одного: не может быть атома с зарядом ядра меньше единицы. Но периодический закон химических элементов не дает ответа на вопрос, сколько же элементов за ураном.

Много труда положили химики, разыскивая в природе элементы тяжелее урана. Не раз в научных журналах появлялись торжествующие извещения о «достоверном» открытии нового тяжелого элемента с атомным весом бо́льшим, чем у урана. Например, элемент № 93 «открывали» в природе многократно, он получал имена «богемий», «секваний». Но эти ложные открытия оказывались каждый раз следствием ошибок. Они по существу характеризуют чрезвычайную трудность точного аналитического определения ничтожных следов нового неизвестного элемента с неизученными свойствами.

Результат этих поисков был отрицательным, потому что элементов, соответствующих

тем клеткам таблицы Менделеева, которые должны быть расположены за 92-й клеткой, на Земле фактически нет.

Первые попытки искусственно получить новые элементы тяжелее урана были связаны с одной из замечательных ошибок в истории развития науки. Было замечено, что под влиянием потока нейтронов многие элементы становятся радиоактивными и начинают испускать β-лучи. Ядро атома, потеряв отрицательный заряд, сдвигается в периодической таблице на одну клетку вправо, и его порядковый номер становится на единицу больше — происходит превращение элементов. Под воздействием нейтронов образуются более тяжелые элементы.

Естественно, что была сделана попытка подействовать нейтронами и на уран. Ученые надеялись, что, так же как и у других элементов, у урана при этом появится β-активность и в результате β-распада возникнет новый элемент с номером на единицу большим, который и должен занять 93-ю клетку в системе Менделеева. Было высказано предположение, что этот элемент должен быть похож на рений, поэтому он был заранее назван «экарением».

Первые опыты, казалось, сразу же подтвердили такое предположение. Даже больше, было обнаружено, что при этом возникает не один новый элемент, а несколько. Были опубликованы сообщения о возникновении сразу шести новых элементов тяжелее урана. Кроме экарения, были «обнаружены» экаосмий, экаиридий, экаплатина и эказолото.

И все открытия оказались ошибкой. Но это была замечательная ошибка. Она привела науку к величайшему из достижений физики за всю историю человечества — к овладению энергией атомного ядра.

Оказалось, что все было не так. Никаких трансурановых элементов не было найдено. У странных новых элементов тщетно пытались найти предполагаемые свойства, которыми должны были обладать элементы от «экарения» до «эказолота». И вдруг среди этих элементов неожиданно были обнаружены радиоактивный барий и лантан. Не трансурановые, а самые обычные элементы, места которых находятся в середине периодической таблицы Менделеева.

Прошло немного времени, и этот очень неожиданный и очень странный результат был правильно понят.

Почему из атомных ядер урана, стоящего в конце периодической системы элементов, при действии нейтронов образуются ядра элементов, места которых находятся в ее середине? Например, было найдено, что при действии нейтронов на уран возникают элементы, соответствующие следующим клеткам периодической системы:

| | | |
|---|---|---|
| 35 — бром | и | 57 — лантан |
| 36 — криптон | и | 56 — барий |
| 37 — рубидий | и | 55 — цезий |
| 38 — стронций | и | 54 — ксенон |
| 39 — иттрий | и | 53 — йод |
| 40 — цирконий | и | 52 — теллур |

Много элементов было найдено в невообразимо сложной смеси радиоактивных изотопов, образующихся в уране, облученном нейтронами. Хотя все они оказались старыми, давно зна-

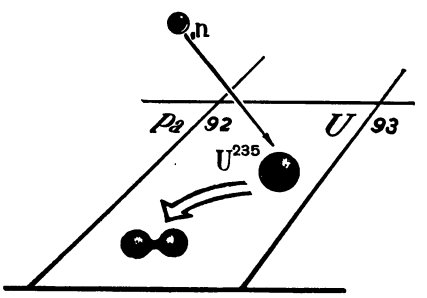



**Рис. 14. Когда нейтрон попадает в ядро урана-235, оно возбуждается, в нем возникают сильные колебательные движения, похожие на колебания капли воды.**

комыми химикам элементами, в то же время это были новые вещества, впервые созданные человеком.

В природе нет радиоактивных изотопов брома, криптона, стронция и других тридцати четырех элементов — от цинка до гадолиния, возникающих при облучении урана.

В науке часто так бывает: самое загадочное и самое сложное оказывается простым и ясным, когда оно разгадано и понято. Оказалось, когда нейтрон попадает в ядро урана, оно раскалывается, расщепляется на два «осколка» — на два атомных ядра меньшего веса (рис. 14). Эти осколки могут быть различной величины, поэтому-то и образуется так много различных радиоактивных изотопов обычных химических элементов.

Одно атомное ядро урана (92) распадается на атомные ядра брома (35) и лантана (57), осколки при расщеплении другого могут оказаться атомными ядрами криптона (36) и бария (56). Каждый раз сумма атомных номеров образующихся осколочных элементов будет равна 92.

Это было началом цепи великих открытий, изменяющих судьбу человечества. Вскоре было

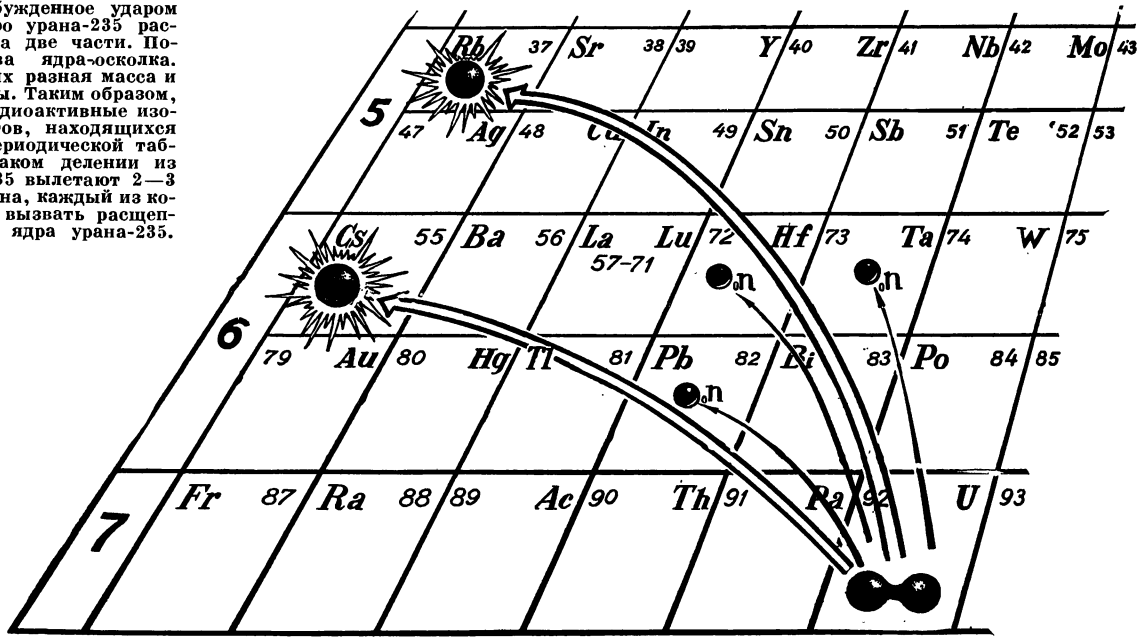



Рис. 15. Возбужденное ударом нейтрона ядро урана-235 раскалывается на две части. Получаются два ядра-осколка. Обычно у них разная масса и разные заряды. Таким образом, возникают радиоактивные изотопы элементов, находящихся в середине периодической таблицы. При таком делении из ядра урана-235 вылетают 2—3 новых нейтрона, каждый из которых может вызвать расщепление нового ядра урана-235.

обнаружено, что под ударом нейтрона возникают из ядра атома урана-235 не только осколки — ядра с меньшим весом, но и два-три нейтрона (рис. 15). Каждый из этих нейтронов в свою очередь способен снова вызвать расщепление атома урана. А при каждом таком распаде выделяется очень много энергии. Это и стало началом овладения человеком внутриатомной энергией.

Среди огромного множества осколочных продуктов при расщеплении ядер урана был впоследствии обнаружен остававшийся долгое время незамеченным первый настоящий трансурановый элемент — № 93 (рис. 16 и 17). Он возникал при действии нейтронов на уран-238. Химическими свойствами он оказался весьма сходным с ураном и совсем не был похож на рений, как это ожидали при первых попытках синтезировать элементы тяжелее урана. Поэтому его и не могли сразу обнаружить.

Первый созданный человеком элемент, лежащий за пределами «естественной системы химических элементов», был назван **нептунием**, по имени планеты Нептун. Его создание расширило для нас границы, определенные самой природой. Так же и предсказанное открытие планеты Нептун расширило границы наших знаний о солнечной системе.

Вскоре был создан и 94-й элемент. Он также получил имя, взятое «с неба», в честь последней планеты солнечной системы. Его назвали **плутонием**. В периодической таблице Менделеева он следует по порядку за нептунием, аналогично последней планете солнечной системы Плутону, орбита которой лежит за орбитой Нептуна.

94-й элемент был обнаружен точно в соответствии с законами построения периодической системы. Он возникает из первого искусственного трансуранового элемента нептуния при его $\beta^-$-распаде (рис. 18).

Плутоний — единственный из трансурановых элементов, который теперь получают в атомных реакторах в очень больших количествах. Так же как и уран-235, он способен расщепляться под действием нейтронов и применяется как «топливо» в атомных реакторах.

95-й и 96-й элементы носят названия «америций» и «кюрий». Они также получаются те-

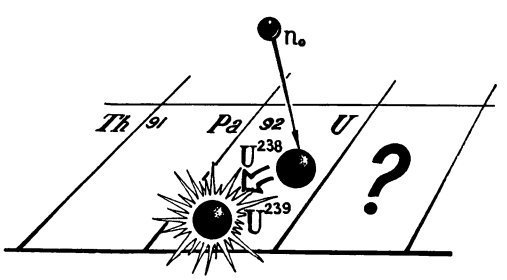



Рис. 16. Нейтрон, попавший в ядро урана-238, остается в ядре. Образуется новый изотоп урана — уран-239. Такого урана в природе нет. Это короткоживущий атом, обладающий $\beta^-$-радиоактивностью.

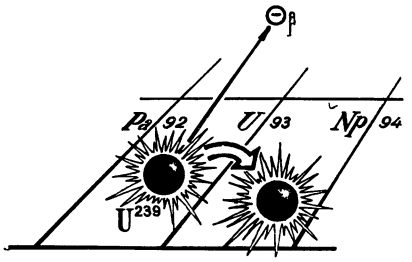



Рис. 17. При потере одной β⁻-частицы уран-239 превращается в элемент № 93 — первый трансурановый элемент —нептуний.

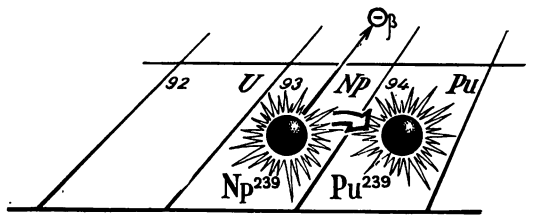



Рис. 18. Нептуний, теряя β-частицу, превращается в плутоний.

перь в атомных реакторах. Оба элемента обладают очень большой радиоактивностью — испускают α-лучи. Радиоактивность этих элементов настолько велика, что растворы их солей нагреваются, закипают и очень сильно светятся в темноте.

Все трансурановые элементы — от нептуния до америция и кюрия — были получены в достаточно больших количествах, чтобы подробно изучить их свойства. В чистом виде это металлы серебристого цвета, все они радиоактивны и химическими свойствами очень похожи друг на друга, а все вместе — на уран.

Очень интересный элемент **калифорний**—шестой после урана. Калифорний впервые был создан по методу, основанному на периодическом законе: пластинка урана была подвергнута в циклотроне бомбардировке ядрами углерода, обладающими большой энергией. Почему при этом должен получиться 98-й элемент калифорний, сообразите сами. Рисунок 19 вам в этом поможет.

Был выделен в чистом виде и 97-й элемент — **берклий**. Для этого пришлось положить чистый препарат плутония внутрь ядерного реактора, где он целых шесть лет находился под действием мощного потока нейтронов. За это время в нем и накопилось несколько микрограммов элемента № 97. Плутоний извлекли из атомного реактора, растворили в кислоте и из смеси выделили наиболее долгоживущий берклий-249. Он радиоактивен — за год распадается наполовину. Пока удалось получить только несколько микрограммов берклия. Но этого количества хватило ученым, чтобы точно изучить его химические свойства.

Очень интересна история открытия двух следующих трансурановых элементов: 99-го и 100-го. Впервые они были найдены в облаках и в «грязи». Чтобы изучить, что образуется при термоядерных взрывах, самолет пролетел сквозь взрывное облако и на бумажные фильтры были собраны пробы осадка. В этом осадке и были найдены следы присутствия двух новых элементов. Чтобы получить более точные данные, на месте взрыва собрали большое количество «грязи» — измененной взрывом почвы и горной породы. Эту «грязь» переработали в лаборатории и из нее выделили два новых элемента. Их назвали **эйнштейнием** и **фермием**, в честь ученых Эйнштейна и Ферми, которым человечество многим обязано за открытие путей, как овладеть атомной энергией: Эйнштейну принадлежит закон эквивалентности массы и энергии, а Ферми построил первый атомный реактор.

Найдены и другие методы получения обоих этих элементов, правда, пока еще в столь исчезающе малых количествах, что даже увидеть их никому не удалось.

Одним из самых великих достижений, которым по справедливости может гордиться наука, следует назвать создание 101-го элемента, который получил имя великого творца периодической системы химических элементов, положившей начало овладению тайнами строения атома,— имя Дмитрия Ивановича Менделеева.

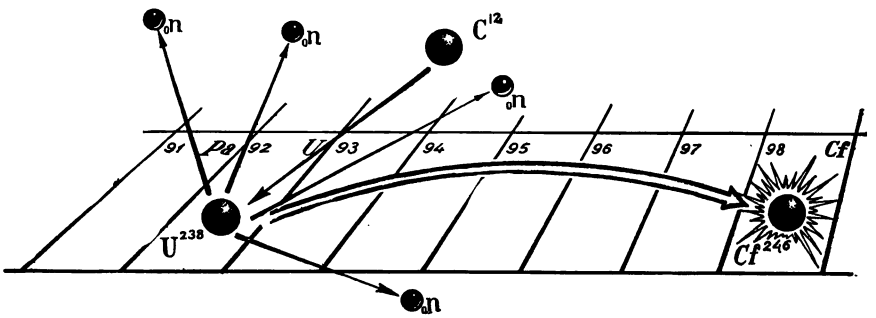



Рис. 19. Калифорний возникает при обстреле урана-238 ядрами углерода.

**Менделевий** был получен следующим образом (рис. 20). На листочек тончайшей золотой фольги нанесли совершенно невидимое покрытие, состоящее приблизительно из одного мил-

лиарда атомов эйнштейния. Альфа-частицы с очень большой энергией, пробивая золотую фольгу с обратной стороны, при соударении с атомами эйнштейния могли вступать в ядерно-химическую реакцию и образовывали атомы нового, 101-го элемента. При таком соударении образовавшиеся атомы менделевия вылетали с поверхности золотой фольги и собирались на другом, расположенном рядом, тончайшем золотом листочке. Таким остроумным путем удалось выделить в чистом виде атомы 101-го элемента из сложной смеси эйнштейния и продуктов его распада. Невидимый налет смывался кислотой и подвергался радиохимическому исследованию.

Поистине это было чудом. Исходным материалом для создания 101-го элемента в каждом

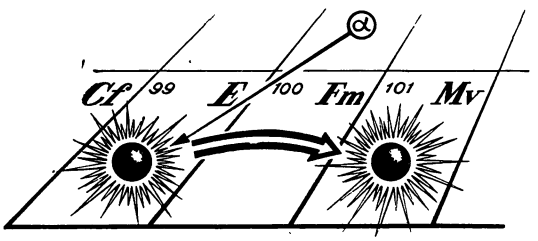



**Рис. 20. Теряя α-частицу, калифорний превращается в менделевий.**

отдельном опыте служил приблизительно один миллиард атомов эйнштейния. Это очень мало — значительно меньше одной миллиардной доли миллиграмма, а получить эйнштейний в большем количестве было невозможно. Заранее было подсчитано, что из всего миллиарда атомов эйнштейния при многочасовой бомбардировке альфа-частицами может прореагировать всего только один-единственный атом эйнштейния и, следовательно, может образоваться только один атом нового элемента. Нужно было не только суметь его обнаружить, но и сделать это так, чтобы выяснить **по одному** лишь **атому** химическую природу элемента.

И это было сделано. Успех опыта превзошел расчеты и ожидания. Удалось заметить при одном эксперименте не **один,** а даже **два** атома нового элемента. Всего в первой серии опытов было получено **семнадцать** атомов менделевия. Этого оказалось достаточно, чтобы установить и факт образования нового элемента, и его место в периодической системе и определить его основные химические и радиоактивные свойства. Оказалось, что это альфа-активный элемент с периодом полураспада около получаса.

В последние годы ученые искусственно изготовили 102-й и 103-й элементы. Первый пока не получил названия, а второму дали имя **лоуренсий** (в честь Лоуренса — изобретателя циклотрона).

В 1964 г. советские ученые синтезировали изотоп 104-го элемента (см. ст. «На пути к открытию элемента 104»).

## ЗАГЛЯНЕМ В БУДУЩЕЕ

Пустых мест в менделеевской таблице больше нет. Все они уже заполнены. Все элементы открыты. Уже создано немало новых, каких никогда на Земле не бывало. Так, может быть, все уже сделано? Может быть, могучая идея Д. И. Менделеева, многие десятки лет руководившая развитием химии, завершила все, что она могла дать, и для нее остается только почетная роль повседневной помощницы химиков в их будничной работе? Может быть, принцип периодичности, на котором основана естественная система химических элементов, ограничен только электронной оболочкой атомов? Нет, это неверно.

Когда великий ученый начинал свою работу над естественной системой химических элементов, из 92 известны были 63, а о существовании многих других вообще никто не подозревал. Сколько же элементов мы знаем теперь? Сколько изотопов известно для каждого элемента? Сколько различных атомных ядер существует в природе? Сколько новых создано человеком?

Мы теперь уже знаем сто четыре элемента. Есть основания думать, что скоро будут открыты элементы 105 и 106. Нет ни одного элемента, у которого был бы только один изотоп. Одни элементы состоят из доброго десятка различных видов атома, у других их меньше. Есть много элементов, у которых вообще нет устойчивых изотопов, но нет ни одного элемента, у которого не было бы радиоактивных изотопов.

Всего теперь (1965 г.) уже известно около 1600 различных атомных ядер для 104 элементов.

Сколько же из них создала природа и сколько создано человеком? Такое сопоставление приводит к неожиданному и удивительному результату.

В природе найдено для **восьмидесяти девяти** элементов только около 325 различных изотопов. Совсем еще недавно считалось, что в природе очень мало неустойчивых радиоактивных изотопов.

Было установлено, что **семнадцать** радиоактивных изотопов принадлежат ряду урана, в ряде распада тория их **одиннадцать**, в цепочке

распада урана-235 найдено **четырнадцать** изотопов. Кроме них, в природе были обнаружены радиоактивные «одиночки»: калий-40, рубидий-87 и несколько других.

Было установлено также, что в природе, на границе с космосом, образуются непрерывно и непрерывно исчезают углерод-14 и изотоп водорода — тритий.

Вот и все. Все остальные природные изотопы — более 275 — считались устойчивыми.

Но за последние годы развитие измерительной техники привело к неожиданным результатам. Многие из тех изотопов, которые безусловно считались стабильными, вечными, оказались в действительности тоже неустойчивыми, радиоактивными. Таких уже найдено свыше **пятидесяти.**

Среди них есть и поистине удивительные: например, висмут-209 с измеренным периодом полураспада более $2 \cdot 10^{18}$ лет (!) или кальций-48, живущий свыше $1 \cdot 10^{18}$ лет, или изотоп свинца-204, распадающийся наполовину за $1{,}4 \cdot 10^{18}$ лет. По сравнению с такими «мафусаилами», продолжительность жизни которых во много раз превышает возраст самого земного шара, такие изотопы, как железо-58, цинк-64, платина-192 (живут «всего лишь» около $10^{15}$ лет), можно, пожалуй, назвать «короткоживущими» (!).

С точки зрения науки наших дней трудно уже разграничивать стабильные и нестабильные виды атомных ядер. Несомненно, по мере роста точности и чувствительности измерений будут обнаруживаться все новые и новые, еще более долгоживущие, но, бесспорно, неустойчивые радиоактивные изотопы. И становится оправданным предположение, что, может быть, вообще не могут существовать абсолютно устойчивые, вечные атомные ядра. Всякое вещество всегда изменчиво.

Итак, в природе немногим более 300 различных ядер. Но только за три десятилетия, истекшие с той поры, как были найдены пути к созданию новых радиоактивных элементов, человек уже сумел получить свыше 1200 новых радиоактивных ядер для всех без исключения элементов.

Будут ли установлены когда-нибудь какие-либо общие закономерности в тех свойствах вещества, которые зависят только от атомного ядра? Это очень большой и принципиально важный вопрос. От ответа на него зависит в будущем и познание природы человеком. Ответ на него — это путь к познанию строения атомного ядра, сегодня во многом еще недоступного. Но мы уже можем сказать, что это будет сделано. И начало будущего ответа на этот важнейший вопрос, который решит наука будущего, намечается в периодической таблице атомных ядер.

Посмотрите внимательно на начальную часть таблицы у стр. 337 которую можно назвать прообразом периодической таблицы атомных ядер. Это по существу та же периодическая таблица Менделеева, но в каждой клетке ее приведены все атомные ядра, известные для того или иного элемента. В нее включены все изотопы всех известных в наши дни элементов — как природные, так и искусственные. Целиком напечатать ее здесь нельзя: она слишком громоздка. Здесь изображено только ее начало — от водорода до скандия.

Обратите внимание на проходящую посередине таблицы толстую черную линию. Зубчатой чертой она соединяет устойчивые изотопы смежных элементов. Присмотритесь: все ядра, расположенные под этой чертой, помечены красным, а над ней они обозначены синим цветом. Эта черта разделяет позитронную и электронную β-неустойчивости атомных ядер.

Очень много замечательно интересных данных содержит таблица атомных ядер, но еще больше она таит в себе. Даже представить себе трудно, сколько тайн будет открыто и какими необъятными возможностями эта таблица поможет овладеть науке!

В таблице атомных ядер четко выражена одна замечательная закономерность, сразу бросающаяся в глаза. Присмотритесь к таблице внимательно, и вы сами заметите различие между четными и нечетными элементами. У каждого нечетного элемента, начиная со фтора, только один (иногда два) устойчивый изотоп, а у всех четных — по нескольку устойчивых изотопов. Например, у фтора — девятого элемента — один нерадиоактивный изотоп, но зато у его соседей с обеих сторон (у восьмого — кислорода и десятого — неона) их по три. Эта загадочная закономерность может быть прослежена по всей таблице для всех элементов.

В качестве примера можно выбрать уже знакомую нам триаду: железо — кобальт — никель. Для четного железа известны четыре устойчивых изотопа, для четного никеля — пять, а для нечетного кобальта — только один.

Очевидно, что с закономерностью чередования устойчивости четных и нечетных ядер связана и замечательная закономерность распространенности четных и нечетных элементов в земной коре и во всем мироздании.

Но не надо думать, что этим и ограничивается периодическая закономерность, проявляю-

щаяся в таблице атомных ядер. Систематическое изучение свойств огромного числа стабильных и радиоактивных ядер всех природных и искусственных изотопов приводит к очень важному выводу, что в атомном ядре существуют энергетические уровни, подобно тому как существуют энергетические уровни во внешних электронных оболочках атомов.

Сопоставление самых разнообразных свойств изотопов, зависящих от атомного ядра, с числом нейтронов или протонов, входящих в его состав, приводит к выводу, что в ядрах существуют нейтронные и протонные оболочки, что в строении атомных ядер существуют периоды так же, как существуют периоды в строении атомных оболочек. И если электронные оболочки становятся особенно устойчивыми, когда они содержат 2 (гелий), 10 (неон), 18 (аргон), 36 (криптон), 54 (ксенон) и 86 (радон) электронов, то внутриядерные нейтронные и протонные оболочки становятся наиболее устойчивыми, когда в атомных ядрах содержится 2, 8, 20, 50, 82 и 126 нуклонов (протонов или нейтронов). Эти удивительные числа — они недаром получили название **магических чисел** — определяют устойчивость атомных ядер и особую периодичность в изменении их физических свойств.

Изотопы с магическими числами протонов или нейтронов обладают особенно высокой распространенностью в природе, элементы с магическим числом протонов обладают особенно большим числом стабильных изотопов. Магические ядра наиболее устойчивы по отношению к захвату нейтронов при ядерных реакциях, они наиболее прочны, подобно тому, как наиболее прочны атомы благородных газов.

Все четыре цепочки радиоактивного распада урана, актиния, тория и нептуния заканчиваются на магических ядрах: $_{82}Pb^{206}$, $_{82}Pb^{207}$ $_{82}Pb^{208}$, $_{83}Bi^{209}$.

С первого взгляда может показаться, что закономерность чередования четных и нечетных элементов нарушена у хлора (17), аргона (18) и калия (19). Но это — результат проявления «магических» свойств числа 20. Все ядра с двадцатью нейтронами устойчивы. Двадцать протонов в ядре Са обеспечивают устойчивость шести изотопам.

Изучение таких свойств у атомных ядер, как магнитные свойства, абсолютная распространенность, дефект массы ядра, энергия связи, радиоактивность, показывает, что в них наблюдаются периодические изменения, периоды которых обусловлены наличием в некоторых ядрах магического числа протонов или нейтронов. На этих устойчивых ядрах заканчиваются периоды в таблице атомных ядер, аналогично тому как в таблице химических элементов периоды заканчиваются на устойчивых атомах благородных газов. На начальном участке таблицы атомных ядер намечены три первых магических числа: 2, 8 и 20.

Рано еще говорить, что уже существует периодическая система атомных ядер, но великий закон Менделеева о периодической закономерности в свойствах химических элементов явно оказывается справедливым не только для внешней электронной оболочки атома, но и для атомного ядра, так недавно еще недоступного исследователю. Это указывает на то, что возможности, заключенные в периодическом законе, неисчерпаемы.

Можно быть уверенным, что в ближайшие годы будет создана периодическая система атомных ядер, будут вскрыты глубокие закономерности, связывающие свойства ядра с его количественными характеристиками и с его строением.

Сегодня периодическая таблица элементов служит химикам могучим оружием в борьбе за создание новых химических веществ с заранее заданными свойствами, нужными человеку. Подобно этому периодическая система атомных ядер для химика будущего станет первой ступенью на пути к осуществлению направленного синтеза новых элементов с невиданными свойствами — тех, которые будут необходимы человеку будущего.

Глубоко проникла наука в тайны строения вещества. Человек знает, как построен атом и что происходит в звездах. Одним из наиболее общих законов познанного стал периодический закон химических элементов. Но мир неисчерпаем. И снова наука стоит у порога неведомого. Перед человеком открывается новая беспредельность неизвестного. Новые великие законы должны быть и будут познаны.

Творческий, тяжелый и благодарный труд исследователя, горечь ошибок, радость открытия и неисчерпаемые возможности овладеть новыми, неведомыми, могучими силами природы достаются на вашу долю, читатели Детской энциклопедии. Будьте к этому готовы.

## ХИМИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Но не ограничиваются ли роль и значение закона Менделеева только областью химии? Быть может, он важен и нужен только химикам?

Он помогает им познавать химические свойства вещества, дает возможность создавать новые соединения с удивительными свойствами. Но нужен ли он биологам, изучающим жизнь, и геологам, проникающим в глубь земного шара, и астрономам, открывающим тайны мироздания? Быть может, он их мало интересует, чужд им, далек так же, как далеки пробирки и колбы в лаборатории химика от сияющей на небосводе звезды? Нет, это не так.

Великий периодический закон имеет громадное значение в самых различных областях знания. Совершенно ясно, что периодический закон необходим школьнику, только начинающему изучать химию. А если седовласый академик перестал заглядывать в таблицу Менделеева, то это просто потому, что он давно ее знает наизусть.

## Химия Земли

Для геологов, исследующих нашу планету, наиболее важно знать самые общие законы, определяющие поведение вещества на поверхности земной коры, в ее толщах и в глубинах земного шара. Геолог не может искать вслепую. Он заранее должен знать, где он может найти железо, где — уран, где — фосфор, где — калий. Он должен знать, какие условия создают на Земле залежи углерода: где надо искать уголь, где — графит и где — алмазы. Геологу нужно знать, какие элементы сопутствуют друг другу в земной коре, он должен знать законы образования совместных месторождений различных элементов.

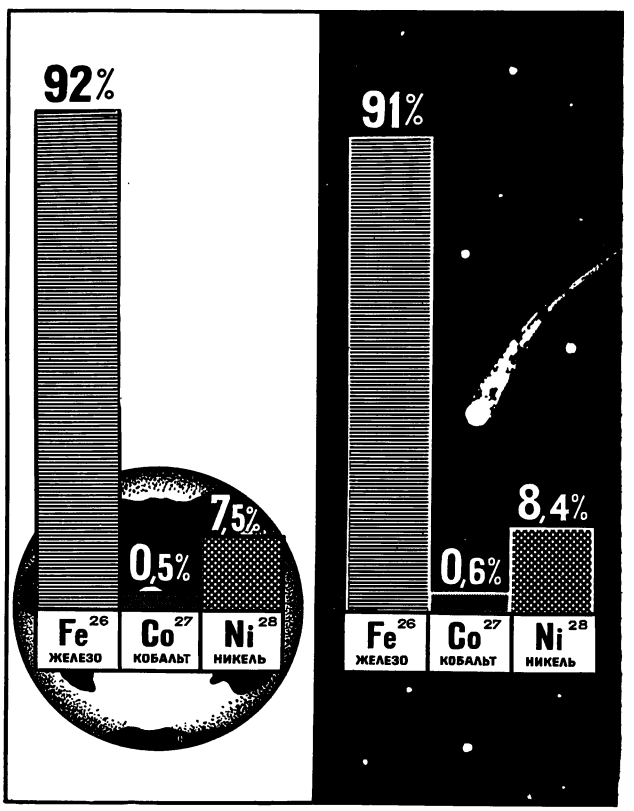
В сложных, грандиозных химических процессах, протекавших в земной коре и на ее поверхности сотни миллионов лет, продолжающихся и в наши дни, сходные своим положением в периодической системе элементы обладают сходной геохимической судьбой. Это позволяет геохимикам проследить их движение в земной коре и выяснить законы, распределяющие их на поверхности Земли.

Геохимическое поведение различных элементов определяется прежде всего строением внешних электронных оболочек в их атомах, размерами атомов и соответствующих ионов. Элементы с завершенными внешними электронными оболочками (благородные газы) существуют только в атмосфере; они не вступают в природных условиях в химические соединения. Даже гелий и радон, образующиеся при радиоактивном распаде, не захватываются полностью горными породами, а непрерывно поступают из них в атмосферу. Редкие земли, стоящие в одной клетке таблицы, встречаются в природе почти всегда вместе. В одних и тех же рудах всегда присутствуют совместно и цирконий, и гафний.

Геологи хорошо знают, что осмий и иридий нужно искать там же, где и платину. В периодической таблице Менделеева они стоят вместе в восьмой группе и так же неразлучны в природе. Месторождения никеля и кобальта сопутствуют железу, и в таблице они в одной группе и в одном периоде.

Основная толща земной коры состоит из немногих минералов; все это — химические соединения элементов, расположенных главным образом в коротких периодах и в начале и в конце каждого из длинных периодов таблицы. Причем преобладают среди них легкие элементы с малыми порядковыми числами. Эти элементы составляют основную массу силикатных горных пород.

Элементы, стоящие в периодической системе в середине длинных периодов, образуют рудные, чаще всего сульфидные, месторожде-




**Соотношение содержания железа, кобальта и никеля на Земле (*слева*) и в метеоритах (*справа*) почти одинаковое.**

ния. Многие из этих элементов встречаются часто и в самородном состоянии.

И распространенность и геохимическое поведение элемента (его миграция в земной коре) определяются его положением в периодической системе. Распространенность зависит от строения атомного ядра. Геохимическое поведение — от строения электронной оболочки.

Поэтому периодическая система элементов необходима геохимику. Без нее не могла бы возникнуть и развиваться геохимия. Эта наука устанавливает общие закономерности во взаимном сосуществовании химических элементов в горных породах и рудах. Она дает возможность геологу находить в толще земной коры месторождения полезных ископаемых.

Периодический закон Менделеева — надежный и испытанный компас геохимика и геолога, разведчиков тайн подземного царства.

## Химия метеоритов

Точнейшие химические анализы огромного числа метеоритов, упавших на нашу планету, дали замечательные результаты. Если подсчитать среднее содержание в метеоритах наиболее распространенных на Земле элементов: железа, кислорода, кремния, магния, алюминия, кальция, то окажется, что на их долю приходится около 94%, содержание этих же элементов в составе земного шара точно такое же.

Среди различных метеоритов, падающих на Землю, много железных. В этих метеоритах:

| | | |
|---|---|---|
| железа | (элемент № 26) | — 91,0%, |
| кобальта | (элемент № 27) | — 0,6%, |
| никеля | (элемент № 28) | — 8,4%. |

Эти же элементы распространены на земном шаре в таком соотношении:

| | |
|---|---|
| железа | — 92,0%, |
| кобальта | — 0,5%, |
| никеля | — 7,5%. |

(За 100% здесь принята сумма этих элементов.)

И на Земле, и в метеоритах эти три элемента находятся приблизительно в одинаковых соотношениях. Таких совпадений можно привести очень много. Вещество на Земле и вещество в небесном пространстве одинаково, оно состоит из одних и тех же элементов в одних и тех же приблизительно соотношениях.

Даже изотопный состав элементов в метеоритах и на Земле почти одинаков. Неоднократно определялся изотопный состав серы, добытой из пепла и лавы вулканов, расположенных в разных частях земного шара. Сера на Земле повсюду одинакова. Везде отношение между стабильными изотопами (сера-32 и сера-34) равно 22,2. Изотопный состав серы в метеоритах, пока единственных представителей космоса, доступных прямому анализу, совершенно такой же: 22,2. Такое же сходство в изотопном составе можно обнаружить и для других элементов. Химические соединения, которые химики обнаруживают в метеоритах, обычны и на Земле.

Самое удивительное в этом, пожалуй, то, что ни одному ученому и в голову не придет удивляться по этому поводу. Химия любого элемента повсюду едина, иначе и быть не может. Все эти совпадения не могут быть случайными.

Откуда бы ни прилетели к нам на Землю случайные гости из Вселенной — быть может, это части комет, принадлежащих солнечной системе; быть может, это обломки малых планет; быть может, это вестники из чужого звездного мира, — важно одно: химическим составом, соотношением между элементами, изотопным составом, химическими соединениями, которые были найдены в метеоритах,—всем этим они сообщают нам, что действие великого закона Менделеева не ограничивается пределами нашей планеты. Он справедлив для всей Вселенной, где существуют атомы с их электронной оболочкой. Материя всюду едина.

## Химия планет

Своеобразна химия больших планет. Пока еще она очень мало изучена.

Юпитер — самая большая планета солнечной системы. Химическим составом он похож на Солнце. Он почти целиком состоит из водорода, на долю гелия приходится только 10%, а на все остальные элементы — не более 5%. Это мир страшного холода, вечных бурь в атмосфере метана и аммиака, мир непрерывных гроз чудовищной силы. Радиоволны от молний на Юпитере достигают Земли. Эти условия и определяют странную химию Юпитера. Ее удалось разгадать совсем недавно.

Химики воспроизвели в своих приборах условия, царящие на поверхности Юпитера: низкую температуру до —140°Ц, мощные электроразряды. Оказалось, что при этом в метане и аммиаке образуются ярко окрашенные соединения, неустойчивые в земных условиях: сво-

бодные радикалы— ненасыщенные производные метана и радикалы кислородных соединений азота.

Так была объяснена загадка — цветные облака в атмосфере Юпитера. По-видимому, этим же можно объяснить и красное пятно на поверхности Юпитера. Оно больше, чем все материки на Земле, и состоит, вероятно, из свободных радикалов — обычной формы существования вещества на этой планете.

В недрах Юпитера больше всего атомарного водорода в свободном состоянии. В центральных областях планеты, при очень высоких давлениях, он образует фазу неведомого в земных условиях металлического водорода.

Вторая по величине планета — Сатурн. Условия существования на нем химических соединений, вероятно, сходны с условиями на Юпитере. На Сатурне также обнаружен метан. В его атмосфере плавают облака, состоящие из замерзшего аммиака и воды. Предполагают, что и кольца Сатурна состоят из кристалликов замерзшей воды. Химия Юпитера и Сатурна — это, по-видимому, химия свободных радикалов и свободных атомов.

Марс больше, чем остальные планеты, похож на Землю. В его атмосфере обнаружен азот с примесью аргона, есть углекислота. Многие ученые уверены, что на Марсе есть вода. Пока еще не удалось установить, есть ли на нем свободный кислород, но зато найдены признаки окислов азота.

Другая соседка Земли, планета Венера, еще более загадочна. В ее атмосфере обнаружена пока только углекислота, есть признаки присутствия молекулярного азота, как будто бы есть и вода, но твердо это еще не доказано.

Все соединения и свободные радикалы, найденные астрофизиками на планетах солнечной системы, — метан ($CH_4$), аммиак ($NH_3$), углекислый газ ($CO_2$), окислы азота (NO, $NO_2$), молекулярный азот ($N_2$), молекулярный водород ($H_2$) и другие соединения, включая свободные радикалы,— все они наиболее характерны для элементов углерода, азота, водорода, кислорода в соответствии с их положением в менделеевской таблице.

## Химия Солнца

Трудно даже вообразить, что человек может изучить химию Солнца. Но наука сумела многое сделать: мы знаем теперь химический состав Солнца, знаем (и знаем уже немало) о грандиозных процессах—источниках солнечной энергии.

С помощью спектрального анализа было найдено на Солнце более шестидесяти элементов периодической системы Менделеева. Наверное, будут найдены и остальные.

Определены даже количественные соотношения между химическими элементами на Солнце. Оказалось, что Солнце — это мир раскаленного водорода. Водородных атомов там почти в пять раз больше, чем атомов гелия, и в тысячу раз больше, чем атомов всех остальных элементов, вместе взятых.

Среди других элементов на Солнце преобладают углерод, кислород и азот. Немало там и магния, алюминия, кремния, серы, железа. В меньшем количестве присутствуют калий, кальций, натрий, свинец и другие. Обнаружено даже несколько представителей редких земель; можно быть уверенным, что будут найдены и остальные. Как и повсюду в мироздании, на Солнце преобладают легкие элементы, с малыми атомными номерами. Кроме того, как правило, элементов с четными порядковыми номерами на Солнце значительно больше, чем их соседей по периодической таблице с нечетными номерами.

Мало того, если не считать водорода и гелия, занимающих в мироздании вообще особое положение, то наблюдается замечательное соответствие между относительным содержанием остальных элементов на Солнце и в каменных метеоритах (см. табл. у стр. 337).

Обнаружены на Солнце и простейшие химические соединения, молекулы которых способны выдержать очень высокую температуру. Это не какие-нибудь особые, «солнечные» соединения — нет, химики умеют их получать и исследовать на Земле. Это простейшие радикалы: CH, OH, NH, CaH, SiH, CN. Более сложные молекулы, вероятно, не могут существовать на Солнце.

## Первое применение спектрального анализа

**Знаменитый буржуазный философ О. Конт пытался доказать ученым всю безнадежность попыток узнать, из чего состоят небесные тела — определить их химический состав.**

**Ученые Кирхгоф и Бунзен, открывшие спектральный метод анализа, очень убедительно показали всю несостоятельность пессимистического утверждения философа-идеалиста. С помощью качественного спектрального анализа они определили для начала со сравнительно небольшого расстояния (в несколько десятков километров) состав праздничного фейерверка.**

С точки зрения старой химии, имеющей дело только с электронными оболочками атома, химия Солнца, по-видимому, очень проста. Но на Солнце протекают процессы ядерной химии, и в очень грандиозных масштабах.

Периодический закон Менделеева помогает разобраться в том, что происходит на Солнце (и, конечно, на звездах, похожих на наше Солнце) и какие превращения испытывают на Солнце атомные ядра. В его недрах, при немыслимо высоких температурах и давлении, атомы элементов теряют почти все свои электроны. В условиях сжатого до огромной плотности газа, состоящего главным образом из протонов и электронов, ядер гелия и относительно небольшой примеси ядер и ионов других элементов, протоны могут вступать между собой и с ядрами других элементов в ядерно-химические реакции.

Солнце — это мир водорода. Ядра остальных элементов окружены со всех сторон протонами (ядрами водорода) и могут сталкиваться почти исключительно лишь с протонами. Другие столкновения происходят значительно реже. Если скорости и энергия сталкивающихся атомных ядер достаточно велики, то при столкновении оба ядра сливаются и возникает новый элемент.

На Солнце протекает очень много различных ядерных реакций. Далеко не все они хорошо изучены, о многих из них мы еще и не подозреваем.

Одна из известных нам ядерных реакций на Солнце имеет особое значение. Она определяет природу Солнца. Это реакция образования гелия из водорода. Она протекает различными путями. Протоны могут соединяться непосредственно друг с другом. При этом образуются ядра дейтерия (тяжелый изотоп водорода) и гелия-3 (легкий изотоп гелия). Реагируя с протонами, они образуют ядра гелия-4.

Но еще интереснее и важнее сложная ядерная каталитическая реакция — синтез гелия из водорода на углеродных атомах. Эта реакция протекает не сразу, а в несколько ступеней. Катализатором в этой солнечной реакции служит углерод, точнее, его наиболее распространенный изотоп $C^{12}$, тот самый, которого больше всего и на Земле.

Первая стадия реакции — соединение ядер водорода с ядрами изотопа углерод-12. При этом возникает атомное ядро с семью положительными зарядами: у углерода их шесть, а с протоном добавляется еще один. Возникает атом нового элемента, ядро которого обладает семью зарядами, а атомный вес увеличивается на единицу. С таким атомным ядром ученые знакомы; на Земле его нет, но они уже умеют получать его искусственно.

Согласно правилу сдвига, элемент при увеличении заряда ядра на единицу превращается в другой, занимающий в таблице Менделеева следующую по порядку клетку. Углерод-12, захватив протон, превращается в азот — в радиоактивный изотоп азота $N^{13}$ (рис. 21). Период его жизни невелик: за 10 минут он распадается наполовину. Выбрасывая позитрон и нейтрино, тяжелый азот превращается снова в тяжелый изотоп углерода—$C^{13}$ (рис. 22). Не нужно думать, что это какой-то особенный «солнечный» углерод. Его много и на Земле: в земном углероде изотопа $C^{13}$ около одного процента.

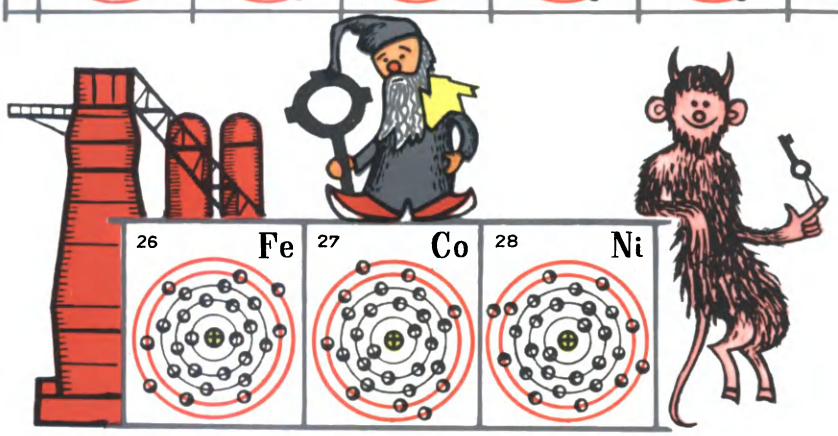
Образовавшееся ядро тяжелого углерода $C^{13}$, подвергаясь новым ударам протонов, может слиться с тем из них, который обладает достаточно большой энергией. При этом, как следует из периодического закона, возникает ядро азота (рис. 23), но уже с бо́льшим атом-

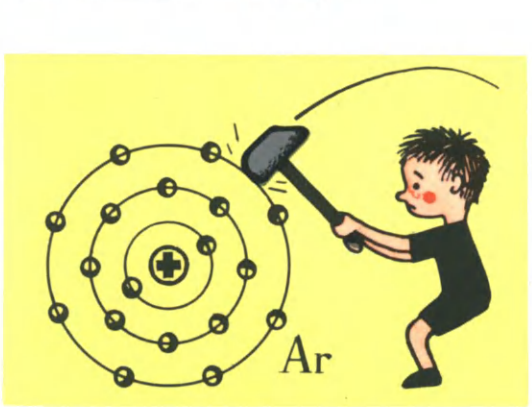
***Таблица к статье «Великий закон»***

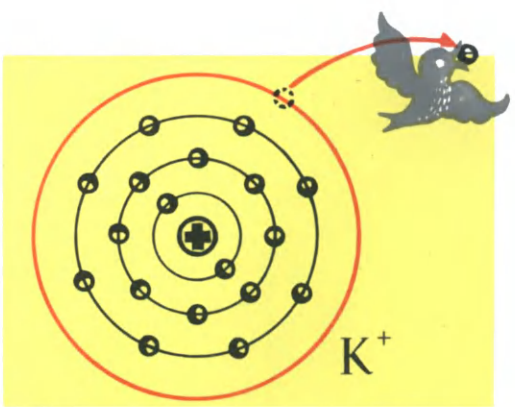
***В верхней части*** **таблицы показано расположение электронных оболочек в атомах элементов, находящихся в начале периодической системы. Обратите внимание, что общее число электронов соответствует порядковому номеру элемента, а число электронов внешней, валентной оболочки равно номеру группы, в которой находится элемент (внешняя оболочка — красная окружность). У атомов гелия, неона и аргона внешние электронные оболочки устойчивы. Так же устойчивы они и у всех элементов, входящих в эту группу.**

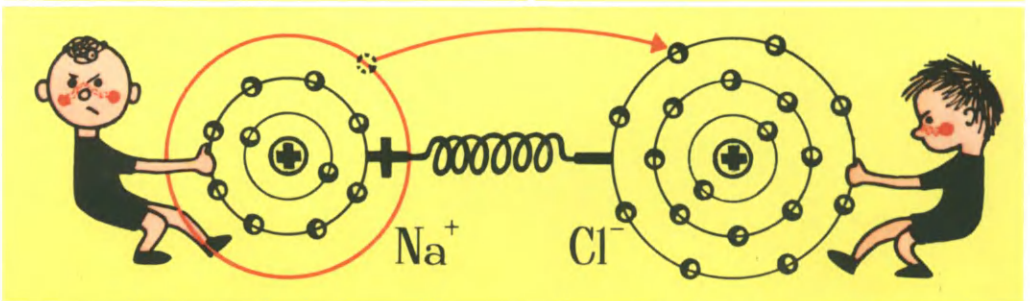
***Ниже*** **изображено строение атомов трех элементов — железа, кобальта и никеля, расположенных в середине длинного четвертого периода. Внешние электронные оболочки у них одинаковы: на них по два электрона. Поэтому химические свойства этих элементов очень близки друг другу. Но в химических реакциях у этих элементов могут принимать участие и электроны, находящиеся на более глубокой оболочке. Она у них еще недостроена, на ней может находиться самое большее 10 электронов, а на внешней — 8. Обе эти оболочки заполняются только у 36-го элемента — благородного газа криптона.** ***На нижних рисунках*** **(на желтом фоне) изображено строение атомов аргона, калия и молекулы поваренной соли. Атом аргона обладает тремя до предела заполненными электронными оболочками. На внутренней — гелиевой —2 электрона. Средняя оболочка сходна с внешней оболочкой неона. На средней и внешней оболочках по 8 электронов. Все три оболочки очень прочны; их трудно разрушить. Совсем по-другому построены электронные оболочки калия. На внешней оболочке у него только один электрон, который очень слабо связан с атомом и легко может оторваться даже при слабых воздействиях. Образовавшийся при этом положительный ион калия очень прочен, он построен так же, как атом благородного газа.** ***Внизу*** **на желтом фоне изображена схема химической реакции между натрием и хлором. Атом натрия легко теряет свой единственный валентный электрон. И этот электрон захватывается атомом хлора, на внешней оболочке которого недостает одного электрона. Образуются два иона: положительный — натрия и отрицательный — хлора. Оба они сходны с атомами благородных газов. Возникающие между ними огромные силы электрического притяжения обусловливают большую прочность молекулы поваренной соли.**

| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | O |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 H | | | | | | | | 2 He |
| 2 | 3 Li | 4 Be | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | | 10 Ne |
| 3 | 11 Na | 12 Mg | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S | 17 Cl | | 18 Ar |



H
H
H
H
ν
ν
IV
V
VI
β
β
B
6
C
7
N
8
O
9
C13
N13
N14
O15
C12
N15
14
Si
15
P
16
S
γ-лучи
γ-лучи
He
(α)

# 4H → He

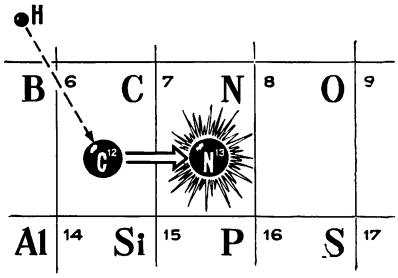



Рис. 21.

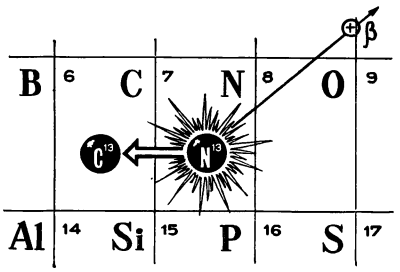



Рис. 22.

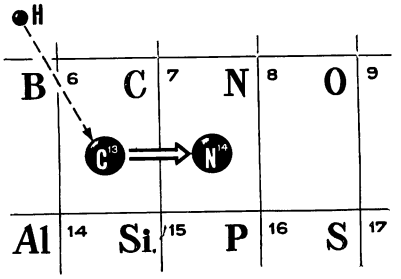



Рис. 23.

ным весом: на этот раз возникает самый обычный азот $N^{14}$, который содержится в атмосфере Земли и который мы вдыхаем вместе с кислородом.

Какие бы элементы ни возникали на Солнце в цепи ядерно-химических превращений, какие бы элементы там ни существовали, их судьба предопределена: они снова и снова должны участвовать в протонных превращениях. Такова же судьба и изотопа азота $N^{14}$: его ядра будут реагировать с ядрами водорода. При их соединении, согласно правилу сдвига, должно возникнуть ядро легкого кислорода $O^{15}$ (рис. 24). Такого изотопа на Земле нет, но физики умеют его получать и хорошо изучили его свойства. Он радиоактивен и исчезает в короткое время. При распаде этот изотоп испускает позитрон и нейтрино и уже в третий раз превращается в азот, в тяжелый изотоп азота — $N^{15}$ (рис. 25). Он стабилен, хорошо известен и в небольшом количестве всегда присутствует в обычном земном азоте.

На Солнце в это атомное ядро снова внедряется протон, и тут ядро $N^{15}$ сразу распадается, выбрасывая α-частицу (ядро атома гелия), и превращается в ядро обычного углерода $C^{12}$ (рис. 26), с которого началась эта удивительная цепь последовательных ядерных превращений.

Итак, на Солнце атомное ядро углерода в результате четырех последовательных ядерных реакций с протонами, трижды превратившись в азот, один раз — в тяжелый углерод, один раз — в кислород, выбросив по дороге два позитрона, потеряв две загадочные частицы — нейтрино, превращается в конце концов в тот же самый изотоп углерода $C^{12}$ и α-частицу.

В результате углерод остался таким же, каким он и был. Но исчезли четыре водородных ядра, и возникло ядро гелия. Оно сформировалось на углеродном атомном ядре, которое осталось без изменений, послужив ядерным катализатором в ядерно-химической реакции — в синтезе гелия из водорода. Таким образом, во-

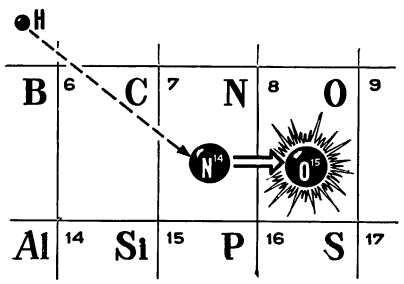



Рис. 24.

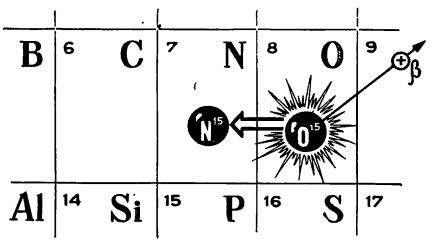



Рис. 25.

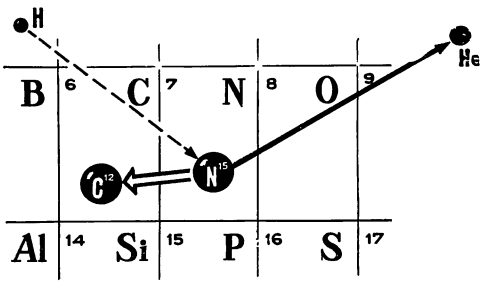



Рис. 26.

*Таблица к статье «Великий закон»*

**Глубоко в недрах Солнца температура достигает 20 000 000°. При такой температуре протекают ядерно-химические реакции между водородом (протонами) и углеродом, азотом и кислородом. На таблице изображен цикл этих реакций и указаны сдвиги элементов в периодической системе, происходящие при этих реакциях. Этот цикл замкнутый. В его результате образуются атом гелия и 4 атома водорода. При этом выделяется солнечная энергия.**

дород на Солнце — топливо, а гелий — зола, отбросы.

Долго, невообразимо долго продолжается этот замечательный ядерный цикл реакций: должно пройти почти 5 млн. лет, пока атом углерода после всех последовательных превращений станет снова атомом углерода. Ведь да-

леко не каждое соударение с протоном ведет к реакции. Требуются миллионы лет, чтобы среди бесчисленного множества столкновений ядер углерода с протонами произошло столкновение с таким быстрым протоном, энергия которого так велика, что он способен проникнуть в маленькую неприступную крепость — атомное ядро.

Но и с такой скоростью (за 5 млн. лет одно полное превращение) эта реакция может идти только при температуре не ниже 20 млн. градусов. Температура же на поверхности Солнца не превышает 6000°. Это означает, что тайна Солнца скрыта в его недрах, в его центральных областях, где, как рассчитывают ученые, царят чудовищно высокие температуры, близкие к 20 млн. градусов.

Не нужно думать, что все только что изложенное — это лишь предположение ученых. Физики уже сумели повторить в лабораториях все стадии солнечного ядерно-химического процесса. Ученым не нужно ждать миллионы лет, чтобы осуществить самую медленную стадию этого цикла. В ускорителях получают протоны с такой большой энергией, которая превышает их возможную энергию при 20 млн. градусов на Солнце.

Спектроскописты сумели определить, сколько углерода на Солнце. Они измерили, сколько в нем тяжелого изотопа $C^{13}$. Физики рассчитали скорость этой реакции, нашли, сколько энергии выделяется при каждом полном цикле. Астрономы измерили массу солнечного шара, рассчитали температуры в его глубинах.

В результате большой общей работы было найдено, что при 20 млн. градусов и при том количестве изотопа $C^{13}$, какое было найдено на Солнце, должно возникать ровно столько энергии, сколько ее излучает Солнце.

Посмотрите на солнышко, как много чудесного рассказали ученым его ласковые лучи, в которых вы греетесь и загораете летом, о таинственных и загадочных процессах, протекающих за миллионы километров от нашей Земли. Но еще не все понятно, не все изучено. Многое и многое остается на вашу долю, юные читатели Детской энциклопедии.

## Межзвездное пространство

Еще не так давно в науке допускалось, что межзвездное пространство представляет собой пустоту. Все вещество Вселенной сосредоточено в звездах, а между ними нет ничего. Лишь в пределах солнечной системы где-то по неведомым путям блуждают метеориты и их загадочные собратья — кометы.

Удивительно сложны и неожиданны пути зарождения одной из наук будущего — химии космического пространства. В глухие и страшные годы фашистской оккупации в маленьком голландском городке Лейдене на тайном собрании подпольного научного кружка юный студент Ван де Холст сделал доклад. Исходя из теории строения атома (которая, как мы уже знаем, была развита наукой на основе периодического закона Менделеева), он рассчитал, какова должна быть самая длинная волна в спектре излучения водорода. По его расчету, оказалось, что длина этой волны 21 *см*. Она относится к коротким радиоволнам. В отличие от хорошо изученного видимого спектра, излучаемого раскаленным водородом, его радиоизлучение может происходить и при низких температурах.

Ван де Холст рассчитал, что на Земле такое излучение в атоме водорода маловероятно. Нужно ждать много миллионов лет, пока в атоме водорода произойдет перемещение электронов, которое сопровождается излучением радиоволн длиной 21 *см*.

## Солнце—ядерный реактор

**Может возникнуть вопрос: хороший ли с точки зрения техники наших дней ядерный реактор — Солнце? Но какое в этом может быть сомнение?**

**Давайте посчитаем... Основной источник энергии на Солнце — термоядерная реакция: синтез гелия из водорода. Главным образом за счет этой реакции оно каждую секунду излучает в мировое пространство $3{,}86 \cdot 10^{26}$ *дж*.**

**Только для того чтобы поддержать этот расход энергии, масса Солнца каждую секунду уменьшается на 4,3 млн. тонн!!**

**Из этой невообразимо чудовищной по земным масштабам энергии и до нас доходит немало: у границ земной атмосферы на каждый квадратный сантиметр приходится в секунду энергия 0,14 *дж*. Это составляет две калории в минуту на 1 *см*$^2$. Прикиньте сами, сколько приходится на весь наш земной шар! Неплохой ведь, кажется, реактор! Верно?**

**Сколько же энергии выделяется на Солнце в расчете на единицу его массы? Какова его удельная мощность? Массу Солнца астрономы сумели измерить очень точно: она равна $1{,}991 \cdot 10^{30}$ *кг*, или $1{,}991 \cdot 10^{27}$ тонн. Из этого следует, что удельная мощность Солнца очень невелика, она составляет всего $\frac{3{,}86 \cdot 10^{26}}{1{,}991 \cdot 10^{27}} = 1{,}94 \cdot 10^{-1}$ $\frac{дж}{т \cdot сек}$ на каждый грамм солнечной массы. Таким образом, удельная мощность Солнца равна всего-навсего приблизительно 0,2 *вт* на тонну! Пожалуй, Солнце не очень эффективный источник энергии.**

В своем докладе молодой ученый сделал предположение: если в безграничном мировом пространстве присутствует водород, можно надеяться обнаружить его по излучению на волне 21 *см*. Это предсказание оправдалось. Оказалось, что из необъятных глубин Вселенной к нам на Землю всегда, не прекращаясь ни ночью ни днем, приходят на волне 21 *см* поразительные радиосообщения о тайнах мироздания, которые, как неведомый диктор, рассказывает нам межзвездный водород.

Волна в 21*см* мчится к нашей планете из столь отдаленных уголков Вселенной, что требуются тысячи и миллионы лет, пока она дойдет до антенн радиотелескопов. Она рассказала ученым, что в космосе нет пустоты, что в нем существуют невидимые глазу облака космического водорода, которые простираются от одной звездной системы к другой. Оказалось возможным даже определить протяженность и форму этих скоплений водорода. Для волны в 21 *см* в мировом пространстве нет преград. Даже черные, непроницаемые облака космической пыли, скрывающие от взора исследователя огромные области Млечного Пути, совершенно прозрачны для холодного излучения водорода. И эти волны помогают теперь ученым понять природу вещества, из которого построены далекие звезды не только Млечного Пути, но и самых отдаленных туманностей, лежащих на самом краю доступной нам части Вселенной.

Необъятные звездные миры, разобщенные чудовищными расстояниями в пустом безграничном пространстве, теперь оказываются связанными в единое целое гигантскими водородными облаками. Трудно проследить преемственность в развитии научных идей, но, несомненно, что есть прямая и непрерывная связь между смелым предсказанием юного голландского студента и определившей в науке эпоху великой идеей Менделеева.

Безграничное мировое пространство нельзя считать пустым. Теперь уже, кроме водорода, в нем найдено очень много других элементов.

Химия космоса очень своеобразна. Это — химия сверхвысокого вакуума. Средняя плотность вещества в пространстве всего только $10^{-24}$ *г/см*$^3$. Такой вакуум пока нельзя создать в лабораториях физиков. Важнейшую роль в химии космического пространства играет атомарный водород. Следующий по распространенности — это гелий, его раз в десять меньше; найдены уже кислород, неон, азот, углерод, кремний — их в космическом пространстве ничтожно мало.

Остальные элементы пока трудно определимы. Большая часть элементов в межзвездном пространстве находится в виде атомов. Но уже обнаружены и химические соединения. Это простейшие радикалы; найден радикал CH, есть признаки, указывающие на присутствие в космосе гидроксила. Это особенно интересно: где есть гидроксил, там может быть и вода, а где вода — там возможна жизнь.

Выяснилось, что роль межзвездного вещества в мироздании огромна. На его долю приходится, по крайней мере в пределах нашей Галактики, почти половина всего вещества, остальная часть находится в звездах. Есть основания считать, что состав вещества в космическом пространстве сходен со звездным веществом.

На наших глазах зарождается новая наука. Трудно предвидеть пути ее развития и предсказать, к каким удивительным открытиям приведет эта наука — космическая химия.

## Химия звезд

В недрах звезд, при немыслимых для Земли условиях, при температурах в сотни миллионов градусов и непостижимо огромных давлениях, протекает множество разнообразных ядерно-химических реакций.

В наши дни уже существует обширная область науки: увлекательная химия недоступного — ядерная астрохимия. Она выясняет важнейшие для всей науки вопросы: как образовались во Вселенной элементы, где и какие элементы возникают, какова их судьба в вечном развитии мироздания.

Методы этой науки необычны. Она пользуется и наблюдением — изучает с помощью спектроскопии состав звездных атмосфер, и экспериментом — исследует реакции быстрых частиц в земных ускорителях. Теоретические расчеты позволяют ученым заглянуть в недра звезд, где уже открыто немало интересного и кроется много загадочного.

Выяснено, например, что в центральных областях звезд, при сверхвысоких температурах и давлениях, где скорость «выгорания» водорода особенно велика, где количество его мало, а содержание гелия велико, возможны реакции между ядрами гелия. Там рождаются загадочные ядра бериллия-8 (на Земле они совсем не могут существовать»), там возникают и самые прочные ядра: углерод-12, кислород-16, неон-20 и другие ядра «гелиевого» цикла.

Найдены в звездах и такие ядерно-химические реакции, при которых возникают нейтроны. А уж если есть нейтроны, то можно понять, каким путем появляются в звездах и почти все остальные элементы.

Но очень много загадок стоит еще перед наукой на этом пути. Непостижимо огромно многообразие звезд во Вселенной.

Вероятно, во всех доступных нашему наблюдению звездах преобладает водород, но содержанием других элементов звезды очень сильно различаются: в некоторых звездах обнаружено такое высокое содержание отдельных элементов по сравнению с обычными звездами, что их даже так и принято называть в астрономии: «магниевые», «кремниевые», «железные», «стронциевые», «углеродные» звезды. Недавно обнаружены даже «литиевые» и «фосфорные» звезды. Эти таинственные различия в составах звезд еще ждут объяснения.

Удалось проследить и удивительные механизмы образования новых ядер. Оказывается, что не только благодаря сверхвысоким температурам ядра обладают настолько высокой энергией,что способны преодолевать электростатическое отталкивание и реагировать между собой. Очень многие элементы таким путем вообще не могли бы образоваться.

Дейтерий, литий, бериллий, бор при высокой температуре, существующей внутри звезд, очень быстро реагируют с водородом и мгновенно разрушаются. Эти элементы в мироздании «варятся» в холодных «кухнях», возможно, на поверхностях звезд в звездных атмосферах, где возникают мощные электрические и магнитные поля, ускоряющие частицы до сверхвысоких энергий.

Звездные «фабрики», где создаются элементы, ставят перед учеными странные загадки, связанные с таинственными частицами нейтрино. Ученые начинают подозревать, что роль этих неуловимых частичек-призраков далеко не так безразлична, как это казалось совсем недавно. Выяснилось, что возможны такие ядерно-химические процессы, при которых бóльшая часть энергии, образующейся в звезде, уносится не в виде излучения, а только с нейтрино.

Но для звезды это означает катастрофу. Звезда существует в состоянии равновесия благодаря давлению звездного газа и световому давлению, которые уравновешивают силы тяготения. Если же энергия начинает уноситься из внутренности звезды только с нейтрино, которые пронизывают толщи звездных тел без сопротивления, со скоростью света, то звезда больше не может поддерживать изнутри световым давлением, она мгновенно будет сжата силами гравитационного притяжения.

Быть может, так и образуются пока непостижимые звезды — «белые карлики», плотность вещества в которых может достигать многих тысяч тонн на 1 $см^3$. Быть может, такие процессы дают начало и тем гигантским катастрофам, при которых рождаются Сверхновые звезды.

Но нет сомнения, что и эта одна из величайших тайн природы будет разгадана. Мы узнаем и тайну запасов водорода в звездах и в мировом пространстве, будут найдены процессы, ведущие к его образованию и к образованию «молодых» водородных звезд.

Вопрос о появлении сверхновых звезд в мироздании исключительно важен. Должна быть решена загадка, как рождается такое колоссальное количество энергии, которое способно разметать звезду и превратить ее в туманность. Именно это произошло, например, в 1054 г. В созвездии Тельца вспыхнула сверхновая звезда и, затухая, превратилась в Крабовидную туманность.

В наше время эта туманность уже простирается на сотни триллионов километров. Самое интересное — это то, что вспышка сверхновой звезды, постепенно угасая, теряет свою яркость так, как если бы она состояла из изотопа калифорния-254. Его период полураспада — 55 суток — точно совпадает с периодом уменьшения яркости сверхновых звезд (см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов»).

Но, пожалуй, главная задача астрохимии — выяснить, как возникает во Вселенной водород. Ведь в бесчисленном множестве звездных миров происходит непрерывное уничтожение водорода, и его общие запасы во Вселенной должны убывать.

И многие ученые на Западе пришли к тяжелому и мрачному выводу о «водородной смерти» Вселенной.

Они считают, что во Вселенной одна за другой гаснут звезды, исчерпавшие свои запасы водорода. И эти ранее ярко сиявшие светила одно за другим превращаются в холодные мертвые миры, которым суждено вечно носиться в космическом пространстве.

Мрачный вывод о «водородной смерти» Вселенной логически порочен и неверен. Он опровергается опытными фактами, достижениями науки наших дней — химии Вселенной.

Чудесные достижения науки, познакомив-

шие нас с тайнами недоступных звезд, с их составом, с их природой, с таинственными процессами, происходящими в их недрах, основаны на знаниях природы атома, его строения. Эти знания воплощены в великом периодическом законе Менделеева. Но не следует думать, что периодический закон навсегда останется застывшим и неизменным. Нет, он и сам развивается, включая в себя все большее и большее содержание, все глубже и точнее отражая истину законов природы.

Закон периодичности свойствен и строению атомных ядер. Это позволяет надеяться на окончательное решение об относительной устойчивости элементов в мире и о составе всех небесных тел.

Очень много работы вам предстоит, молодые наследники великого Менделеева.

■

# НЕОБЫЧАЙНЫЕ АТОМЫ

Великий закон природы — периодический закон Менделеева — привел науку к раскрытию многих тайн, к разгадке многих загадок о строении вещества.

Мы теперь знаем, что все элементы, где бы они ни существовали — на Земле, на далеких планетах или на недосягаемых звездах,— все они построены по единому плану: вокруг тяжелого положительно заряженного ядра, состоящего из протонов и нейтронов, вращаются легкие электроны. Число зарядов ядра, равное числу электронов, определяет химическую природу элемента.

В начале периодической таблицы на первом месте стоит водород. Его атом наиболее прост — один протон и один электрон.

А могут ли быть атомы легче водорода? Во всех ли атомах вокруг ядра вращаются электроны? Возможны ли атомы без положительного ядра? Существуют ли атомы без электронов? Совсем еще недавно подобные вопросы звучали бы просто нелепо. Но в последние годы физики обнаружили, что существуют весьма странные «атомы». Правда, их жизнь очень коротка. Они рождаются в созданных человеком ускорительных установках, возникают при распаде искусственных радиоактивных изотопов. Много еще загадочного в этих таинственных частицах, и много надежд связывает наука с полной разгадкой их тайны.

## ПОЗИТРОНИЙ

Самый удивительный из странных атомов — это, конечно, атом позитрония — вещества, которому нет и не может быть места в менделеевской таблице. Однако это вещество теперь хорошо известно ученым. И не только физикам. Химики уже научились применять атомы позитрония в своей повседневной работе — когда они изучают строение сложных органических соединений.

Позитроний очень своеобразный атом — **атом без атомного ядра.** Он почти в тысячу раз легче самого легкого атома — атома водорода. Образуется он при встрече позитрона, возникающего при распаде ядер многих изотопов, с обычным отрицательным электроном. Атом позитрония состоит из двух античастиц.

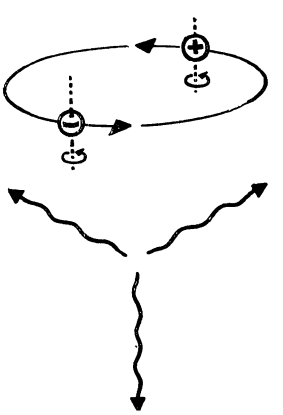
В атоме позитрония нет тяжелого ядра, как в атоме водорода, где масса протона почти в две тысячи раз больше массы вращающегося вокруг него электрона. Массы позитрона и электрона, образующих позитроний, очень малы и равны между собой. Этот странный атом лишен центрального атомного ядра. Обе элементарные частицы в нем вращаются вокруг друг друга или, вернее, вокруг их общего центра тяжести.

«Танец» двух античастиц очень сложен. Ученые установили, что он может происходить по-разному. Вращаясь на общей орбите друг за другом, оба микропартнера в то же время вращаются каждый вокруг своей собственной оси, а это вращение может быть различным: либо в одну и ту же сторону, либо в разные.

Поэтому возможно существование двух изомеров позитрония, т. е. он может существовать в двух формах. В первом случае возникает атом **орто-позитрония,** а во втором — атом **пара-позитрония.** По существу эти изомеры больше ничем друг от друга не отличаются, как не отличаются один от другого волчки, запущенные в разные стороны.

Но один из великих законов сохранения, управляющих атомным миром,— закон сохранения момента количества движения — вносит большие и важные различия в дальнейшую судьбу обоих атомов.

Орто-позитроний с точки зрения атомных масштабов времени живет очень долго. Каждый атом его существует в среднем почти полторы десятимиллионных доли секунды. За это время электрон и позитрон успевают в нем совершить не один миллион оборотов. По нашим привычным земным часам его существование неимоверно кратко. Он исчезает практически мгновенно. Жизнь пара-позитрония еще в тысячи раз короче.



**В орто-позитронии обе античастицы вращаются в одну и ту же сторону. Распадаясь, этот атом превращается в три гамма-кванта.**

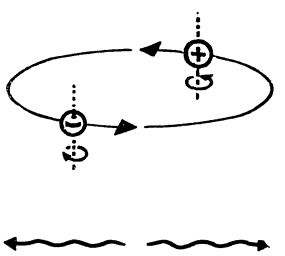
Но это еще не самое удивительное в судьбе изомеров позитрония. Античастицы сосущест-

вовать не могут. Их взаимодействие с неумолимой неизбежностью приводит к взрыву, в микромире происходит катастрофа, и обе античастицы исчезают. Вспышка коротковолнового излучения — и они превращаются в **гамма-кванты**. Вместо них рождаются **фотоны**.

Но орто- и пара-позитроний гибнут по-разному. Непреложный закон сохранений импульса заставляет каждый атом орто-позитрония превращаться в три кванта, при исчезновении же атома пара-позитрония могут возникнуть только два кванта, разлетающиеся в противоположные стороны.

Но, пожалуй, самое удивительное то, что позитроний, этот загадочный, почти невесомый, живущий мгновение атом, **способен вступать в химические реакции**, подобно атому водорода. Особенно энергично позитроний реагирует с теми химическими соединениями, у которых присутствуют свободные валентности. Наиболее чувствителен позитроний к свободным радикалам, к атомам и электронам.

Это замечательное свойство позитрония химики сумели использовать для решения сложных, чисто химических проблем, возникающих при изучении природы химической связи. Оказалось, что при реакции орто-позитрония с веществом, в молекулах которого есть неспаренные электроны, он превращается при распаде не в три, а в два кванта. Это легко обнаружить и измерить гамма-счетчиками.



**В пара-позитронии каждая из античастиц вращается вокруг своей оси в разные стороны. При аннигиляции пара-позитрония рождаются только два гамма-кванта.**

Еще недавно казавшийся невозможным атом-призрак, построенный из двух несовместимых античастиц, стал у физико-химиков замечательным средством исследования тончайших деталей и различий в характере химических связей и строения молекул. Позитроний скоро станет совсем обычным в лаборатории ученого и поможет ему раскрыть немало нового в природе.

## МЕЗО-АТОМЫ

Пожалуй, еще более странны мезо-атомы. Они обладают таким же положительно заряженным ядром, как и обычные атомы, но отличаются от них строением наружной электронной оболочки. В мезо-атомах один из электронов замещен на мезон—на тяжелую частицу с массой в 210 раз больше, чем у электрона. Мезо-атомы настолько необычны, что ставят под сомнение многое из того, в чем физики, изучив размеры и строение атома, были до сих пор твердо уверены.

Чем больше заряд атома, чем больше его порядковый номер в таблице Менделеева, тем сильнее, конечно, его ядро притягивает электроны и тем меньше размеры атома — диаметр электронных орбит в его внешней электронной оболочке. Известно также, что диаметр орбиты зависит и от массы вращающейся частицы. Чем тяжелее она, тем ближе к центральному ядру орбита ее вращения. Таким образом, очень легко можно рассчитать, на каком расстоянии от ядра должна находиться орбита мезона в мезо-атоме.

Физики научились получать в своих ускорителях очень мощные потоки мезонов и точно регулировать скорость мезонов. Оказалось, что медленные мезоны, обладающие тепловой скоростью, блуждая между атомами, захватываются ими и замещают в орбите электроны. При захвате мезонов тяжелыми атомами были обнаружены загадочные, поистине удивительные явления. Точно установлено, например, что ближайшая к ядру орбита, на которой положено вращаться мезону в мезо-атоме свинца (занимающего 82-е место в таблице Менделеева) должна быть в $82 \times 210$ раз меньше орбиты водородного атома. Диаметр мезонной орбиты в мезо-свинце должен быть равен:

$$\frac{10^{-8}}{82 \cdot 210} = 5{,}8 \cdot 10^{-13} см(!).$$

Но размеры ядра в атоме свинца физикам хорошо известны. Его диаметр гораздо больше, чем орбита мезона: он равен $17{,}0 \cdot 10^{-13}$ *см*. Следовательно, массивный мезон в мезо-свинце вращается на орбите, целиком расположенной **внутри атомного ядра**(!).

Этот немыслимый результат точно подтвердился измерениями длины волн — излучения, испускаемого мезо-атомами. В течение громадного (по атомным масштабам) периода времени, за одну миллионную долю секунды, мезон совершает миллионы миллионов оборотов **внутри** ядра. Плотность же ядерного вещества так чудовищно велика, что только 1 $см^3$ его весил бы в земных условиях не менее миллиарда тонн. Как же должно быть построено атомное ядро?

Судьба мезо-атомов завершается катастрофой: мезон поглощается ядром, и оно взрывается — разлетается на множество кусков. Выделяющаяся при этом **энергия аннигиляции** отрицательного мезона и положительного ядерного вещества очень велика. Еще не вполне известно, в какой форме она выделяется. Бóльшую часть ее уносят образующиеся при взрыве частицы.

Так реагируют с атомными ядрами мю-мезоны. Но известны два типа отрицательных мезонов. Судьба пи-мезонов не менее любопытна. Ядра тяжелых атомов поглощают их мгновенно и при этом мгновенно взрываются.

Реакция между мезонами и атомными ядрами не требует высокой температуры. Для нее не нужны сотни миллионов градусов, как для термоядерных реакций. Она с успехом протекает при обычных условиях. Быть может, ядерные реакции на мезонах откроют в будущем новый путь к овладению внутриядерной энергией. Но пока на это еще очень мало надежды. Ученые еще не знают, как заставить мезонные реакции протекать по цепному механизму и поддерживать самих себя.

В самом простом из всех мезо-атомов — в **мезо-водороде** вокруг центрального ядра вращается мезон. Это **атом без электронов**.

Удивительные загадки и трудные задачи связаны с таинственными мезо-атомами. На вашу долю, юные физики, достается очень важная и сложная работа: разгадать тайну строения атомных ядер; наверное, этому поможет и изучение мезонов.

## ГИПЕР-ФРАГМЕНТЫ

Высоко, на границе стратосферы, ученые нашли очень странные атомные ядра. Быть может, это «гости» из неведомых глубин космоса. Построены они весьма

необычно. Атомные ядра всех элементов состоят из нейтронов и протонов, а в этих ядрах один из нейтронов замещен необычной частицей, одной из тех частиц, которых физики, от удивления перед их странными свойствами, назвали «странными». Более точное название этой частицы **лямбда-нуль-гиперон.** Найдено уже немало легких ядер гипер-изотопов: гипер-водорода, гипер-гелия, гипер-лития, гипер-бериллия, даже гипер-углерода. По-видимому, они рождаются в космических лучах. Живут они всего $10^{-10}$ — $10^{-11}$ секунды и очень странным образом исчезают: каждое гипер-ядро может распадаться двумя различными способами. Это — особенность только «странных» частиц.

## АНТИАТОМЫ

Физики установили: каждой из элементарных частиц (кроме фотона) соответствует парная ей античастица с равной массой и противоположным зарядом. Античастица для отрицательного электрона — положительный позитрон. У протона есть свой отрицательный антипротон. Нейтральному нейтрону соответствует тоже нейтральный антинейтрон, они различаются магнитными свойствами. У атомов нашего мира ядра сложены из протонов и нейтронов, их внешние оболочки — из электронов. А может ли быть все наоборот? Как в старой английской детской сказке о девочке, попавшей в мир зазеркалья. Возможны ли атомы, у которых будут антиядра из антипротонов и антинейтронов, а вместо электронов вокруг антиядер будут вращаться античастицы — позитроны. Возможен ли физически **антимир, состоящий** из таких антиатомов?

Да, физики считают, что вполне возможен. Мало того, такой мир даже будет неотличим от того, в котором мы живем. Свет от антизвезд будет в точности таким же, как и от обычной звезды. У фотонов — световых квантов — никаких антифотонов нет. Свет, испускаемый любым атомом, будет абсолютно тождествен свету от аналогичного антиатома. Но пока никто не знает, существуют ли во Вселенной антимиры.

Иногда из глубин Вселенной заходят в нашу солнечную систему очень странные кометы, и их поведение заставляет некоторых ученых думать, что они состоят из антивещества. Далеко, в недоступных глубинах космоса, существуют «радиозвезды». Одна из таких звезд — Лебедь-А — обладает такой невероятной интенсивностью излучения, что его легче всего можно объяснить тем, что в созвездии Лебедя происходит величайшая катастрофа: столкновение двух галактик, двух миров — нормального мира и антимира. Никто пока не может сказать, верно ли это. Вероятнее всего, что излучение Лебедя-А будет объяснено. Но все равно проблема антивещества остается, и наука сейчас усиленно ищет возможность обнаружить антимиры во Вселенной. Один такой путь уже намечен. Он исключительно труден, настолько труден, что, может быть, никогда и не будет осуществлен. Это — путь нейтринной астрономии.

Ученые считают, что рассказать, существует ли где-либо в Большой Вселенной антимир, построенный из антивеществ, может только нейтрино, этот космический «воришка», лишенный массы, который сразу после рождения бесследно исчезает со скоростью света в неведомых глубинах космоса и уносит с собой значительную долю энергии звездных ядерных реакций.

# У ПОРОГА НЕВЕДОМОГО

Напрасно думают, что она [фантазия] нужна только поэту. Это глупый предрассудок! Даже в математике она нужна, даже открытие дифференциального и интегрального исчислений было бы невозможно без фантазии. Фантазия есть качество величайшей ценности...

*ЛЕНИН.*

Периодический закон химических элементов, открытый Менделеевым, управляет поведением вещества во всей Вселенной. Ему подчиняется вся химия. Не только та, которая царствует в колбах и ретортах ученых и в реакторах химических заводов, но и та химия, которая создает все минералы и все горные породы на планете Земля.

Этот закон управляет химией на далеких планетах. Все соединения, открытые на них, построены по правилам, диктуемым таблицей Менделеева. Энергия Солнца и бесчисленных звезд рождается в них за счет ядерно-химических процессов, протекающих в строгом соответствии с периодическим законом. Эти процессы одинаковы и в звездах нашего Млечного Пути, и в других далеких галактиках.

Означает ли это, что мы уже познали самое главное, самое основное, что можно узнать о веществе? Означает ли это, что нет других форм его существования, кроме атомов и атомных ядер, которые наряду с фотонами и нейтрино обеспечивают бесконечное многообразие форм существования материи во всех мирах Большой Вселенной?

Когда развитие науки дает повод утверждать, что все основное в мире уже открыто, что выяснены его общие законы, то это верный признак, что нужно ждать большие открытия, которые потребуют нового пересмотра всего, что в науке стало считаться незыблемым. И, быть может, уже сейчас этот период, период большого революционного пересмотра наших представлений об окружающем мире, уже наступил.

Физика наших дней сумела проникнуть и в тайну строения атомного ядра. «Магические» числа, выражающие периодическую зависимость в изменении свойств атомного ядра от изменения числа нуклонов, указывают на очень сложное его строение. Но для того чтобы разгадать, как построено ядерное вещество, нужно выяснить, из чего оно построено, что представляют собой элементарные частицы.

Наука стоит перед большим затруднением: слишком много оказалось в микромире элементарных частиц. Число их так велико, соотношения между ними так сложны и запутаны, так многообразны их взаимные превращения, что уже давно стало совершенно неоправданным даже само их название.

Но проблема первичных частиц, из которых построено все существующее в мире, остается. Очень много работают над ней физики — и экспериментаторы, и теоретики. Как она будет решена, еще никто не знает. Уже немало предположений — одно необычайнее другого — высказано самыми неистовыми фантазерами в мире — учеными-теоретиками.

Например, серьезно обсуждается гипотеза к в а р к о в. Теоретики показали, что можно объяснить всю сложность и многообразие найденных в микромире элементарных частиц, если допустить, что все они построены только из трех различных типов, быть может действительно элементарных частиц—кварков. Это название заимствовано из старого романа, в котором так названы загадочные фантастические существа, живущие только в грезах. И действительно, свойства новых гипотетических частиц с точки зрения физики наших дней должны быть так необычны и фантастичны, что такое название для них вполне оправдано. Достаточно только сказать, что **кварки должны иметь дробные электрические заряды** (!). Верна или нет эта невозможная гипотеза, пока еще никто не знает. Но она стала нужной науке, она уже существует и, как и всякая научная гипотеза, должна быть доказана либо опровергнута.

У физиков пока еще нет средств разбить на кварки элементарные частицы атомных ядер. В наших ускорителях еще не получены частицы-снаряды с такой большой энергией. Но в природе, в космических лучах такие снаряды есть. И, быть может, под их воздействием «на наших глазах» постоянно атомные ядра разбиваются на кварки; и здесь, вокруг нас, буквально на поверхности Земли существуют эти загадочные, придуманные физиками частицы. Да, это может быть. Уже очень многое из того, что было «придумано» в науке, было затем открыто в природе.

Почему же кварки до сих пор не обнаружены? А как их обнаружить, увидеть? Ведь мы можем видеть только то, что обладает электронной оболочкой и электронами, что может испускать свет или же способно излучать гамма-кванты. Кварки не могут быть видимы. Быть может, их надо собрать и взвесить? Но чтобы их собрать, надо хорошо знать их свойства. А каковы свойства частиц с дробными зарядами? Неизвестно! Какова их физика? Неизвестно!

Очень много таинственного встает перед наукой в мире микрокосмоса. Каждый элементарный акт звездных ядерных реакций, как и ядерных реакций в наших атомных реакторах, сопровождается появлением самой загадочной из элементарных частиц — нейтрино. Как призрак, пронизывает она со скоростью света толщу гигантской звезды и бесследно пропадает в глубинах космоса. Каждую секунду на нашей планете через каждый квадратный сантиметр только от одного Солнца проносится более $6 \cdot 10^{10}$ нейтрино. Но пока мы не можем ни обнаружить этот невероятный поток, ни узнать, куда исчезают нейтрино. А они уносят с собой около 5% всей энергии, выделяющейся в мире.

Куда они с ней исчезают, что происходит с ней в космосе, мы не знаем.

Но, быть может, еще больше тайн открывается перед наукой на другом, противоположном пределе неизвестности — в макрокосмосе. Астрофизики открыли в мироздании небесные тела, совершенно не похожие на все, что до сих пор известно нам во Вселенной. Они не поддаются никакому объяснению, и к ним неприложимы теории, хорошо до сих пор объяснявшие мир. Светимость одного такого тела больше, чем у всех ста миллиардов звезд Млечного Пути. Оно, как предполагают ученые, обладает массой большей, чем у миллиарда звезд, таких, как наше Солнце. Ни один из известных нам процессов не может объяснить, как рождается излучаемая такими небесными телами энергия, которая дает нам возможность наблюдать их с расстояния до 5 млрд. световых лет.

Но в недрах мироздания обнаружены не только эти «сверхзвезды». Ученые подозревают, что, кроме них, во Вселенной могут существовать еще более немыслимые небесные тела. Это действительно сверхудивительные звезды — **«погасшие» звезды**, которые никогда не гасли. Они совершенно не похожи на остывшие холодные планеты. Эти сверхгигантские, бурно сжимающиеся тела обладают огромной температурой, но тяготение их массы так велико что не выпускает «наружу» ни излучение, ни свет, ни нейтрино. Сколько таких «сверхтел» в мире — еще никто не знает. Какую они играют роль в эволюции Вселенной — тоже неизвестно. Но они должны действовать силой тяготения на другие небесные тела, и поэтому их можно обнаружить.

Мы можем считать, что приблизились к разгадке природы звезд, хотя в них и таится еще много, очень много непознанного. Но в космосе есть тайны, о которых наука еще ничего не знает.

Вестники великой неизвестности — **космические лучи** — прилетают к нам на Землю из неведомых глубин космоса. Тысячи ученых во всех странах следят за ними: измеряют их энергию, регистрируют частоту появления, стараются разгадать, где и как они рождаются. Иногда в космических лучах появляются частицы с немыслимо чудовищной энергией. В 1961 г. была зарегистрирована космическая частица, которая одна обладала энергией в $10^{20}$ электроно-вольт. Откуда же эта космическая частица к нам пришла? Как она могла накопить такую энергию? Ведь такая энергия по крайней мере в сотню миллиардов раз превышает ее массу в покоящемся состоянии. Что же с ней должно произойти при остановке? Что станет с ее энергией? Ведь энергия исчезнуть не может.

Многие ученые считают, что в момент столкновения, при остановке, такая сверхбыстрая частица за счет своей кинетической энергии должна образовать множество, быть может даже сотни миллиардов, новых частиц (!). И опыт не противоречит этому. Мало того, расчет показывает, что у таких частиц **внегалактическое происхождение**. Они должны рождаться в других мирах, в других галактиках. Согласно расчету, среди них могут быть частицы с еще большей энергией, вплоть до $10^{80}$ электроно-вольт (!). Этой энергии хватит, чтобы при остановке такой «сверхчастицы» могла бы возникнуть не только звезда, но даже галактика.

Никакая изощренная фантазия, никакая сказка никогда не осмелилась бы создать что-либо столь же немыслимое. А наука наших дней уже ищет, уже пытается нащупать в реальном физическом мире те немыслимые не только для здравого смысла, но и для фантастики реальные рубежи, где соприкасаются как равные бесконечно большое с бесконечно малым.

Возможно ли это? Неизвестно. Но постановка такого вопроса в физике уже возможна. И до чего же интересно все-таки узнать, так ли это.

# НА ПУТИ К ОТКРЫТИЮ ЭЛЕМЕНТА 104

## (Рассказ ученых, ведущих исследование)

**Первый за актиноидами.** В эпоху географических открытий людей пытливых и смелых манили к себе белые пятна на картах. За ними скрывались неведомые страны.

Какими же картами и лоциями руководствовались мы, физики, намечая трассу к новым, еще неизвестным элементам — к белым пятнам таблицы периодической системы Менделеева? Это прежде всего сама система элементов.

На рис. 1 изображена часть таблицы Менделеева. После 88-й клетки идет клетка 89—103. В ней расположены все трансурановые элементы — от 93 до 103-го. Они входят в ряд актиноидов и, как вы знаете, созданы человеком. Все члены ряда мало отличаются друг от друга химическими свойствами и находятся в одной клетке. А какой элемент займет соседнюю, расположенную под гафнием? Ведь он должен обладать замечательными свойствами, должен резко отличаться от своих предшественников—актиноидов.

Теория предсказывала, что таким элементом будет 104-й. Его поведение в химических реакциях должно напоминать гафний. Экагафний — такое имя дал бы ему Д. И. Менделеев.

Если теоретические прогнозы подтвердятся и 104-й окажется аналогом гафния, то это будет новым триумфом периодической системы Менделеева. Но чтобы проверить это, нужно было создать не существующее на Земле ядро нового элемента.

**Свойства ядра 104-го элемента.** Напомним, что номер элемента в периодической системе равен числу протонов, входящих в его ядро. Число нейтронов в ядре того же самого элемента может меняться, а значит, могут существовать атомы элемента с разным количеством нейтронов. Такие атомы называются изотопами. Сумма протонов и нейтронов ядра называется массовым числом. Это число примерно равно массе ядра изотопа, выраженной в массовых единицах. Массовая единица — одна двенадцатая массы атома углерод-12.

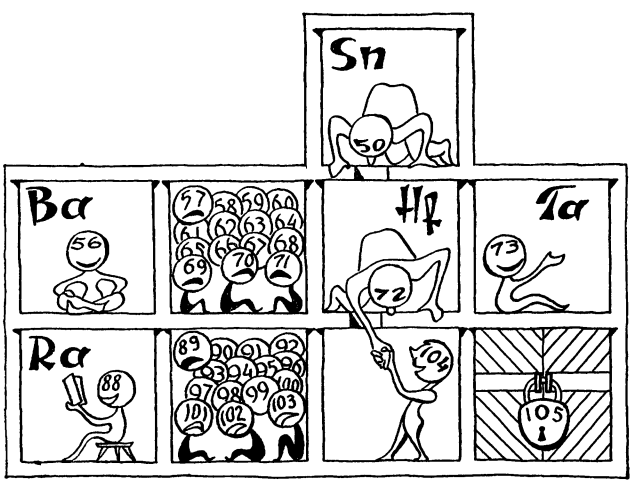



**Рис. 1. Гафний: «Сто четвертый! Мы с тобой очень похожи— у нас по отдельной квартире, не то что у лантаноидов и актиноидов».**

Оценивая возможности синтеза изотопов 104-го, мы пришли к выводу, что с нашими экспериментальными средствами проще всего получить и обнаружить ядро нового элемента 104 с массовым числом 260.

Какие же свойства этого ядра мы могли предвидеть? Все трансурановые элементы нестабильны. Они непрерывно распадаются. Один из способов — альфа-распад. Например, ядро $104^{260}$ делится на два ядра: ядро гелия с зарядом 2 и массой 4 и ядро 102-го элемента с зарядом 102 и массой 256:

$$104^{260} \rightarrow 102^{256} + \alpha^4.$$

Другой способ — спонтанное деление: ядро самопроизвольно (спонтанно) делится на два примерно равных по массе ядра. Образовавшиеся в результате деления ядра называются осколками.

Хотя мы не располагали надежной теорией, объясняющей свойства трансурановых элементов, способ распада ядра $104^{260}$ удалось предсказать. Наши оценки показывали, что новый элемент с массой 260 в основном будет делиться спонтанно.

**Мрачные перспективы.** Теоретики предсказали, что в среднем ядро изотопа $104^{260}$ может жить всего около двух миллионных долей секунды. Из таких предсказаний следовали неутешительные выводы: за миллионные доли секунды нельзя изучить химические свойства элемента; исследование ядерных свойств 104-го будет крайне затруднено. Чем выше номер трансуранового элемента, тем труднее изучать его свойства. Например, если верить расчетам теоретиков, время жизни 106-го элемента — одна десятимиллиардная доля секунды. Следовательно, путь к исследованию высших элементов закрыт. Но обработка данных, полученных опытным путем, давала надежду, что время жизни 104-го должно быть больше вычисленного теоретически. Во сколько же раз? На это мы могли ответить, получив ядра нового элемента и измерив период их полураспада.

**Как получить ядро нового элемента?** Если увеличить заряд ядра, например, на две единицы, то на столько же единиц возрастет порядковый номер элемента в таблице Менделеева. Но как повысить заряд ядра? Обстреляем нейтронами плутоний-242. Ядро $_{94}Pu^{242}$, захватив нейтрон, заряд которого нуль, а масса — единица, превратится в изотоп того же самого элемента плутония с массой в 243 единицы: $_{94}Pu^{243}$.

Ядро изотопа $_{94}Pu^{243}$ само повышает свой заряд на одну единицу, испуская $\beta^-$-частицу — электрон, а следовательно, переходит в ядро с зарядом 95 — в ядро элемента америция: $_{95}Am^{243}$.

В ядерных реакторах с интенсивными потоками нейтронов так могут быть получены все элементы, вплоть до 100-го — фермия. Может быть, удастся получить 101-й — менделевий. Но к высшим элементам (102, 103, а тем более 104-му) такой путь закрыт.

Дело в том, что изотопы элемента, атомный номер которого больше, чем 101, живут в лучшем случае десятки секунд; а процесс захвата нейтронов даже в новейших реакторах с очень большой интенсивностью потока нейтронов продолжается длительное время. Это — десятки дней, а то и месяцы. Ядра изотопов высшего элемента гибнут, не успев родиться.

Но есть другой путь: увеличить атомный номер ядра скачком, слив два сложных ядра. Если, например,

с ядром урана (заряд 92) слить воедино ядро неона (заряд 10), то образуется новое ядро с зарядом 92+10=102, т. е. ядро 102-го элемента:

$$_{92}U^{238} + {}_{10}Ne^{22} \rightarrow 102^{260}.$$

Простая арифметика, но на деле явление оказывается весьма сложным. Сложность его прежде всего в том, что слияние таких ядер может произойти лишь в том случае, если они сближаются с большой скоростью.

Как известно, между ядрами действуют силы двух типов — отталкивание, так как они одноименно заряжены, и ядерное притяжение. Ядерные силы притяжения вступают в действие лишь на очень малом расстоянии между центрами ядер, когда ядра уже соприкасаются поверхностями. Электрические же силы отталкивания действуют на значительно большем расстоянии. Поэтому в обычных условиях ядра не могут слиться. Для этого они должны обладать достаточно большой скоростью. Например, скорость неона, чтобы его ядро слилось с ядром урана, должна быть не менее 90 млн. *км/час* — в 30 000 раз больше скорости самого современного реактивного истребителя! Кинетическая энергия ядра неона при этом будет в 50 млн. раз больше, чем энергия, выделяемая одним атомом углерода при сгорании угля!

Рассмотрим процесс слияния ядер изотопов неона-22 и плутония-242:

$$_{94}Pu^{242} + {}_{10}Ne^{22}.$$

В результате этого процесса в новом ядре будет 104 протона (сумма зарядов неона и плутония), а его масса равна 242+22=264 атомным единицам. Вновь образовавшееся ядро называется составным. Оно ведет себя, как капля жидкости. Эта «капля» ядерного вещества — составное ядро — неустойчива: она «кипит». Таким его делает энергия возбуждения, внесенная тяжелым снарядом — неоном. Составное ядро деформируется, начинает совершать колебания и делится практически мгновенно на ядра-осколки.

Новый элемент не получился. Но...

**В десятимиллиардной доле случаев.** Но, к счастью, не всегда составное ядро мгновенно делится. В одном из десяти миллиардов случаев образовавшееся составное ядро $104^{264}$ не разделится, а «испарит» один за другим четыре нейтрона, отдаст с ними излишнюю энергию и останется жить (рис. 2). «Испарение» нейтронов не влияет на заряд ядра. Только масса за счет потери нейтронов уменьшится на четыре единицы.

Коэффициент полезного действия такого «снаряда», как неон, очень мал. Из-за этого обнаружить ядра 104-го элемента среди неимоверного количества осколков деления и других побочных явлений во много раз труднее, чем, например, ядра 101-го элемента, выход которых в ядерных реакциях в тысячу раз больше.

**Наш циклотрон.** Где взять ядра неона, движущиеся с нужной скоростью — 30 000 *км/сек*? Нужен специальный ускоритель ядерных частиц. В нашей лаборатории (Лаборатория ядерных реакций в Дубне) установлен циклотрон тяжелых ионов — самый мощный в мире. В нем ускоряются ионы, заряженные атомы тяжелее гелия: кислород, неон, аргон.

Магнит циклотрона, в котором ускоряются такие «тяжелые» ионы, должен быть большим: диаметр его полюсных наконечников 310 *см*, а вес 2500 *т*. Остальные узлы и детали циклотрона под стать размерам магнита. Зал циклотрона — огромное помещение высотой 18 *м* и площадью 1500 *м*². Почти зал Большого театра!

В центре — электромагнит циклотрона. Ток, протекающий по его обмотке,— 2000 *а*. Мощность высокочастотного генератора, питающего циклотрон,— 1000 *квт*. Напряжение между ускоряющими электродами — д у а н т а м и — 260 тыс. *в*. 75 000 литров высокого вакуума нужно создать, чтобы работала эта гигантская машина.

В центре циклотрона ионный источник. Из этого сложнейшего устройства ионы начинают свой путь к мишени. Нелегко отработать все узлы циклотрона так, чтобы получить высокую интенсивность ускоренных ионов, падающих на мишень. Работа источника ионов, высокочастотного генератора, вакуумных насосов, стабилизация тока магнита — все это должно быть безукоризненным.

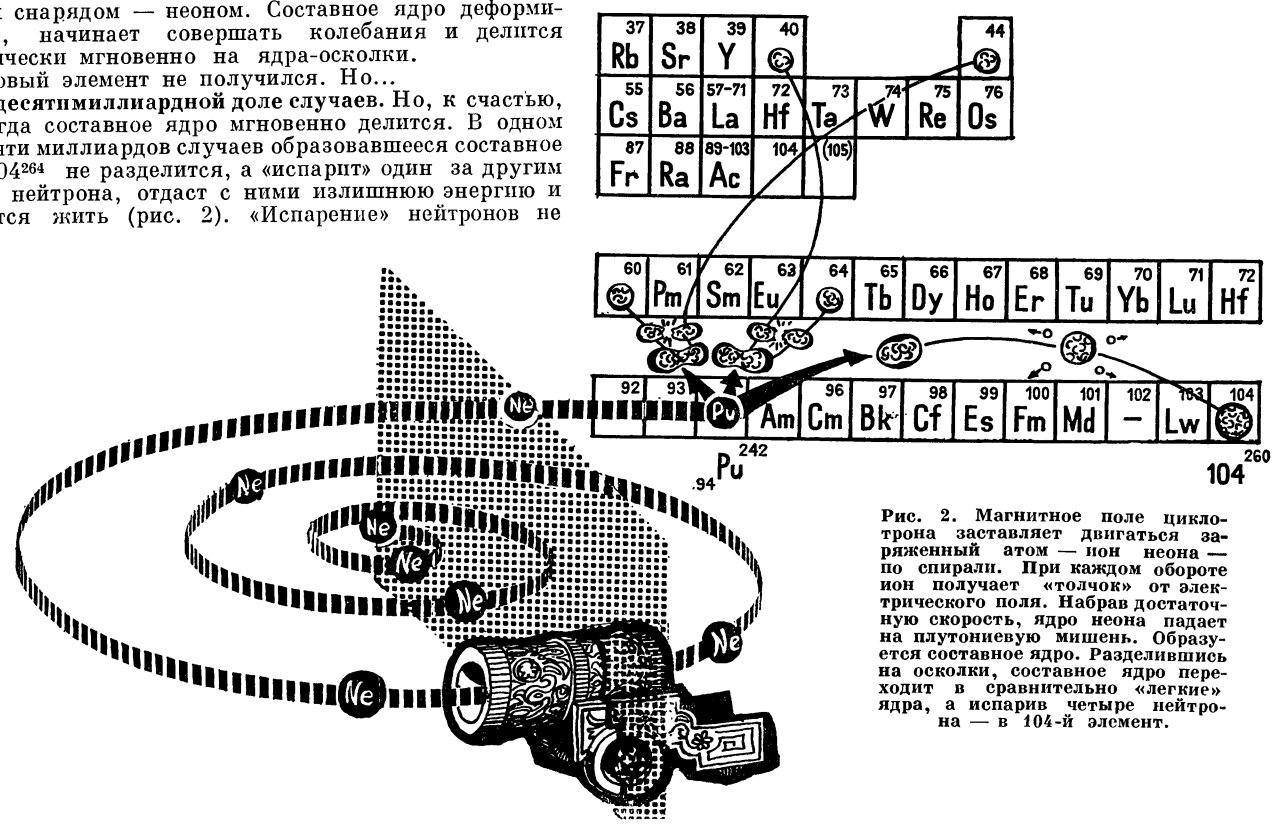



**Рис. 2. Магнитное поле циклотрона заставляет двигаться заряженный атом — ион неона — по спирали. При каждом обороте ион получает «толчок» от электрического поля. Набрав достаточную скорость, ядро неона падает на плутониевую мишень. Образуется составное ядро. Разделившись на осколки, составное ядро переходит в сравнительно «легкие» ядра, а испарив четыре нейтрона — в 104-й элемент.**

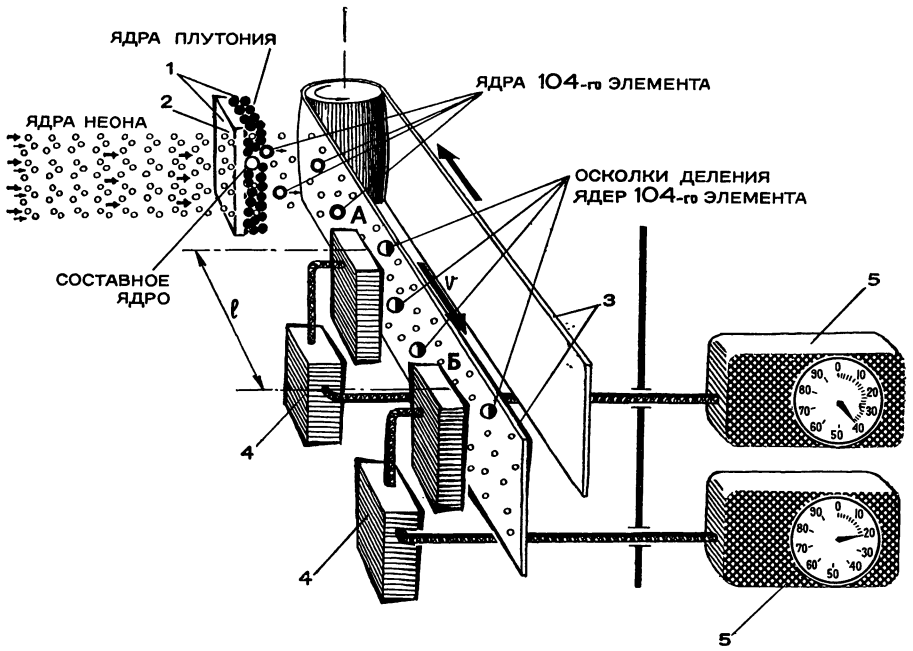



**Рис. 3. Схема опыта получения 104-го элемента.**

В Лаборатории ядерных реакций были получены самые мощные в мире пучки ускоренных тяжелых ионов. Мощность пучков неона в нашем циклотроне в сто раз превосходила мощность пучков, которыми располагают американские ученые. Это упрощало задачу, но все же получить 104-й элемент было чрезвычайно сложным делом.

**Арена ядерных превращений.** Если ядра плутония и ускоренные ядра неона — главные «действующие лица» в создании нового, 104-го элемента, то плутониевая мишень — «сцена», где происходит это ядерное превращение.

Плутониевая мишень устроена так. На 2 *см*$^2$ алюминиевой фольги толщиной в 6—10 *мк* нанесен слой плутония. Фольга с плутонием зажата между медными решетками, которые отводят от нее тепло, выделяющееся, когда ядра неона бомбардируют мишень. Температура ядер неона, падающих на мишень, — миллиард градусов (100 000 000°)!

Не всякий плутоний годится для получения 104-го элемента. У плутония известно 15 изотопов с самыми разнообразными свойствами. Например, период полураспада плутония-232—36 минут, а средняя продолжительность жизни плутония-244 — около 100 млн. лет. Кстати, некоторые ученые считают, что плутоний-244 мог сохраниться с момента рождения нашей планеты, и до сих пор еще пытаются найти его в недрах Земли. Но для синтеза 104-го нужен изотоп $_{94}Pu^{242}$, и на нашу мишень нужно всего 0,002 *г* этого изотопа.

**Схема опыта.** Устройство, с помощью которого мишень вводится внутрь циклотрона в пучок ускоренных ионов, называется п р о б н и к о м. В пробнике, кроме мишени, помещена вся основная аппаратура, необходимая для регистрации ядерных процессов.

На рисунке 3 изображена схема получения и регистрации 104-го элемента. На мишень *1* падает пучок ядер неона. Пройдя алюминиевую фольгу-подложку *2*, неон попадает в плутониевый слой. Сначала ядра неона и плутония сливаются в составное ядро.

Как мы знаем, только одно из десяти миллиардов составных ядер испускает один за другим четыре нейтрона и переходит в ядро 104-го элемента. За счет импульса, внесенного ядром неона, ядро 104-го элемента выходит из мишени и попадает на движущуюся никелевую ленту-конвейер *3*.

Если слой плутония толстый, то ядра 104-го элемента, рождающиеся в нем на большой глубине, не смогут выйти из него. И там, внутри слоя, среди осколков деления составных ядер и осколков спонтанного деления $_{94}Pu^{242}$, невозможно обнаружить ядра 104-го элемента. Поэтому о ядрах 104-го элемента, оставшихся в плутониевом слое, мы ничего не узнаем. Вот почему на квадратный сантиметр мишени больше 0,001 *г* плутония наносить неразумно.

Теперь ядра нового элемента движутся вместе с лентой. Их нужно обнаружить. Мы знаем, что ядро $104^{260}$ должно делиться, но не мгновенно, а через какое-то время после его рождения. За это время никелевая лента успеет перенести ядра 104-го элемента к регистраторам осколков деления. Такими регистраторами могут быть, например, ионизационные камеры *А* и *Б*.

Ядра нового элемента нестабильны и все время самопроизвольно делятся на ленте-конвейере на осколки. Поэтому мимо ионизационной камеры *Б* лента всегда пронесет меньшее число новых ядер, чем мимо камеры *А*, и число разделившихся ядер у камеры *А* будет больше, чем у камеры *Б*.

Если ядро спонтанно разделилось, допустим, около ионизационной камеры *А*, то один из осколков деления вызовет в ней импульс электрического напряжения. Этот импульс поступает по кабелю на электронный усилитель *4*. Усиленный импульс уже можно передать на счетное устройство *5*, расположенное далеко от пробника, на пульте управления циклотроном. Импульс напряжения, попадая на счетное устройство, заставляет стрелку механического счетчика перепрыгнуть на одно деление. Когда опыт закончен, физики записывают число импульсов, поступивших из ионизационных камер на счетные устройства.

Допустим, на одном счетчике зарегистрировано 40, а на другом — 20 импульсов. Следовательно, около камеры *А* разделилось 40, а около камеры *Б* — 20 ядер 104-го. Если скорость ленты $v$, а расстояние между ионизационными камерами $l$, то от камеры *А* до камеры *Б* ядра нового элемента транспортируются за время

$$t_0 = \frac{l}{v}.$$

Камерой *Б* зарегистрировано вдвое меньше импульсов, чем камерой *А*, следовательно, число ядер 104-го элемента, прошедших мимо камеры *Б*, также вдвое меньше. Половина ядер за время их переноса на расстояние $l$ спонтанно разделилась. Значит, $t_0$—это время,

за которое число ядер 104-го уменьшается вдвое, иными словами $t_0$— период полураспада 104-го элемента.

Расстояние $l$ и скорость $v$ мы выбираем сами. Зная эти величины, можно вычислить одну из самых важных характеристик ядра 104-го элемента — период его полураспада. Скорость ленты и расстояние между счетчиками можно изменять. Так, если $l$=0,3 *м*, а $v$=1 *м/сек*, то период полураспада ядер близок к 0,3 секунды; если $v$=10 *м/сек*, а расстояние то же, то период полураспада ядер 0,03 секунды.

**Первые опыты. Слишком много ядер 104-го.** В первом опыте скорость $v$ была выбрана так, чтобы изучить ядра с временем жизни около 0,01 секунды. И сразу же удача. Зарегистрированы спонтанно делящиеся ядра с периодом полураспада 0,014 секунды. Казалось, не нужно и сомневаться, что эти ядра принадлежат 104-му элементу: у ядер всех элементов с меньшим атомным номером период полураспада гораздо больше.

Но, может быть, это ложные импульсы, обусловленные нечеткой работой аппаратуры? Камеры каждый час регистрировали около 20 осколков. Нас смущал слишком большой выход 104-го. По расчетам должно было образовываться не более одного ядра за час работы циклотрона.

**Сто два меньше, чем сто четыре.** Каждый шаг в новую область науки требует колоссальной затраты сил и времени. Бывают ошибочные опыты. Так случилось со шведскими учеными. Они опубликовали работу, где рассказывалось о «впервые полученном» изотопе 102-го элемента. Этому элементу даже было присвоено имя «нобелий». Однако в дальнейшем полученные в Швеции результаты не подтвердились.

Подготовили новый опыт, чтобы убедиться, что действительно мы открыли 104-й элемент. Вместо плутониевой мишени в пробник была поставлена мишень из урана. Если эту мишень облучать неоном

$$_{92}U^{238} + {}_{10}Ne^{22} \rightarrow 102^{260},$$

максимальный заряд ядра будет 102. Сто четвертый в этой реакции не образуется.

Для чего нужно было облучать уран? Что дает этот опыт? В реакции $_{94}Pu^{242} + {}_{10}Ne^{22}$, кроме ядер 104-го, получается значительно большее количество других элементов. Ядра плутония и неона сравнительно редко сливаются полностью. Чаще ядро неона передает ядру плутония только несколько нуклонов. В результате на ленту пробника попадают не только осколки деления, но и более тяжелые ядра, испускающие все виды радиоактивных излучений. В таких условиях могут возникнуть ложные, или, как мы их называем, фоновые, импульсы. Новый опыт был поставлен для того, чтобы убедиться, присутствуют эти ложные импульсы или их нет.

**Фон, который не удалось исключить.** В лабораторном журнале после первого облучения урана-238 неоном-22 появилась запись: «Облучение урана неоном. Получены фоновые импульсы, имитирующие период полураспада спонтанно делящихся ядер порядка 0,014 секунды».

Откуда же взялись такие спонтанно делящиеся ядра? Их не должно быть. Теория и эксперимент указывали: все ядра с порядковым номером меньше 104 с гораздо большим периодом полураспада(!) спонтанно делятся на осколки. Проще всего это можно было объяснить тем, что аппаратура, которую готовили более года, непригодна: в ней создаются ложные импульсы.

Круглые сутки, в любое время дня и ночи, можно было видеть специалистов по электронике и физиков, склонившихся над схемами усилителей и конструкций, над деталями пробника. Они искали ошибки в схемах и в узлах пробника. Но ошибки не обнаруживались. Менялась вся электронная аппаратура и конструкция пробника. И опять опыты. Упорный «фон» оставался. Все время получался период полураспада 0,014 секунды. Может быть, это не фон?

Попробовали применить более легкие бомбардирующие ядра: азот, бор. Если в аппарате есть какая-либо погрешность, то при бомбардировке мишеней легкими ядрами число ложных импульсов не должно меняться. Неожиданно выход ядер с периодом 0,014 секунды резко возрос. Тогда стало очевидным: открыт новый процесс деления ядер, совершенно непредвиденный теорией.

В дальнейшем было выяснено, что с периодом 0,014 секунды делится ядро америция-242, образующееся в возбужденном состоянии в процессе ядерной реакции. Это явление наукой еще до конца не понято. Во всем мире ученые начали исследовать «странные» ядра америция. Многим это явление показалось более интересным, чем синтез нового элемента. Но нас продолжал интересовать именно 104-й элемент.

**Дальнейшие поиски.** Возникла новая опасность: может быть, у 104-го и у америция-242 в возбужденном состоянии период полураспада одинаков? Тогда осколки спонтанного деления нового излучателя замаскируют осколки 104-го. Как же искать 104-й элемент?

Оставалась надежда, что время жизни 104-го лежит в другом временном интервале. Перед нами встала задача — изучить спонтанно делящиеся ядра со временем жизни от $10^{-4}$ до 1 секунды.

Была создана новая методика регистрации ядер 104-го элемента. В принципе она не отличается от прежней, только вдоль ленты нужно было установить на гораздо большей длине несколько детекторов. Это позволило бы сразу в одном опыте регистрировать осколки спонтанного деления в широком интервале времени жизни ядер. Если скорость ленты 1 *м/сек*, первый детектор поставлен в 3 *см* от мишени, а последний — в 8 *м* от нее, то будут зарегистрированы осколки спонтанного деления ядер с периодом полураспада от трех сотых до 4 секунд.

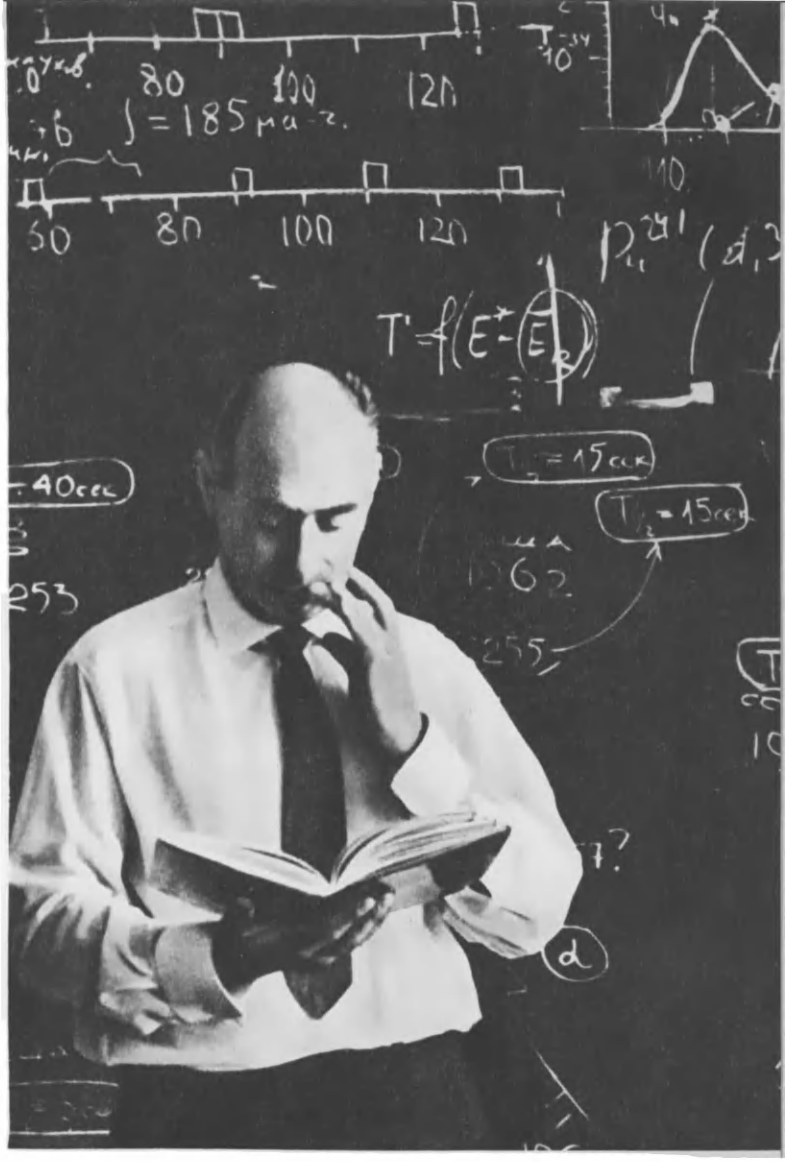
Но где взять детекторы осколков деления, не чувствительные ко всем другим видам радиоактивных излучений? Сложная аппаратура для этого явно не подходит: просто не хватит места разместить ее в пробнике. Но решение было найдено.

**Следы на стекле.** Если к обычной стеклянной пластинке приблизить на расстоянии 2—3 *мм* платиновую фольгу с нанесенным на нее делящимся спонтанно изотопом (например, калифорнием-252), то осколок на его поверхности оставит след. Размер этого следа равен длине цепочки из нескольких атомов. Такие следы, или, как мы называем, т р е к и, невозможно увидеть с помощью оптического микроскопа. Их можно разглядеть с помощью электронного микроскопа. Но и электронный микроскоп для этого нельзя использовать: основная трудность — слишком большое увеличение.

Чем больше увеличение, тем медленнее просматривается под микроскопом предмет большой площади. Понадобились бы целые годы, чтобы, используя электронный микроскоп, обработать результаты одного нашего опыта. Это все равно что с помощью микрометра пытаться определить высоту двухэтажного здания.

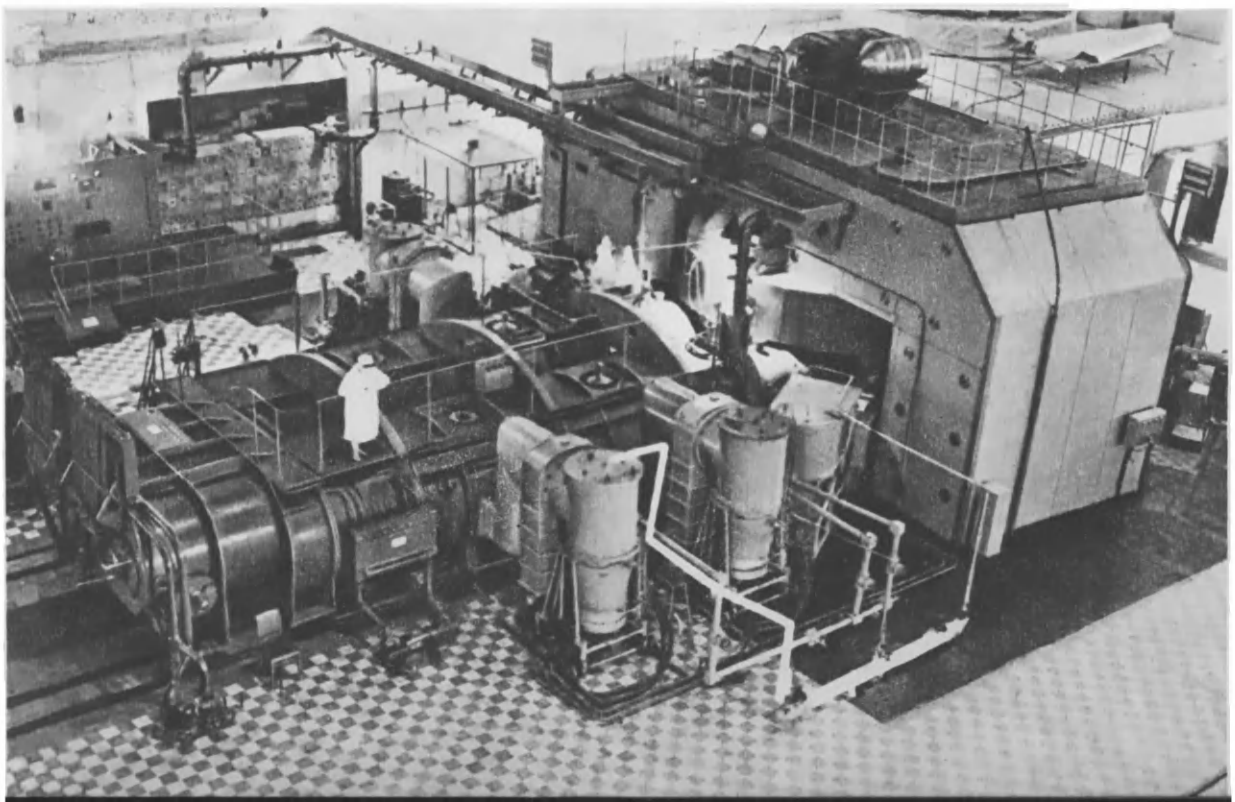
**Проявление треков.** На помощь пришла химия. Как известно, стекло растворяется в плавиковой кис-

*ОПЫТ — ЭТО ДЛИТЕЛЬНЫЙ ТРУД БОЛЬШОГО КОЛЛЕКТИВА УЧЕНЫХ.*




**Каждый этап эксперимента должен быть тщательно продуман, проверен математическими вычислениями.**

**Циклотрон, дававший для опыта многозарядные ионы.**



Физики обсуждают очередные результаты опыта.

В радиохимической лаборатории идет подготовка к анализу вещества, содержащего трансурановые элементы.

Наблюдение за работой пробника.

лоте. Если стеклянную пластинку, обстрелянную осколками делящихся ядер, поместить в плавиковую кислоту, то в местах, куда попали осколки, стекло начнет растворяться быстрее, чем рядом. Через несколько секунд образуется лунка, формой похожая на кратер вулкана (рис. 4). Ее размеры в тысячи раз больше первоначального следа, оставленного на стекле осколком. Лунки треков можно увидеть на поверхности стеклянной пластинки, увеличив их всего в сто раз. Другие радиоактивные излучения наносят на поверхности стекла меньшие повреждения и не просматриваются после травления.

**Стекло-104.** Как мы уже знаем, ядра плутония делятся ускоренными ионами. В результате деления возникает поток нейтронов, и, если в стекле содержатся даже субмикроскопические количества урана или тория, нейтроны разделят их ядра. На поверхности стекла появятся ложные треки.

Нам сварили фосфатное стекло, практически не содержащее ни уран, ни торий. (Случайно стекло это называлось «стекло-104».) Теперь можно было не бояться треков, обусловленных нейтронным потоком в циклотроне. Наша аппаратура стала полностью бесфоновой. Ложные импульсы в ней не могли возникнуть. В наших руках были идеальные детекторы, совершенно нечувствительные ко всем радиоактивным излучениям, кроме спонтанного деления. С их помощью были открыты спонтанно делящиеся излучатели со временем жизни 0,001 секунды и 3 секунды. Казалось, что область, где может находиться 104-й, заселена изомерами — удивительными ядрами, делящимися с невиданной скоростью и маскирующими 104-й.

**Дыхание 104-го.** И опять эксперименты. Ищем 104-й в «щелях» времени между спонтанно делящимися изомерами. Решили установить скорость ленты в 1 *м/сек*. Эта скорость позволяла изучить периоды полураспада спонтанно делящихся ядер во временном интервале от 0,1 до 1 секунды, свободном от изомеров.

Один из опытов. Сорок часов беспрерывно бомбардируют ядра неона плутониевую мишень. Сорок часов лента несет ядра отдачи к стеклянным пластинкам. Наконец, закончено облучение. Извлечены стеклянные пластинки и переданы в лабораторию на обработку. С нетерпением ждем результаты. Проходит несколько часов. Под микроскопом обнаружено шесть треков.

Вычислен период полураспада по положению треков и скорости ленты. Величина периода оказалась равной $0{,}3 \pm 0{,}2$ секунды, т. е. она могла быть, например, 0,1 секунды или 0,5 секунды.

Повторили опыт. Эффект исчез. Новый многочасовой опыт. Обнаружено пять треков, оставленных осколками нового ядра. Еще опыты. Треки в области 0,3 секунды то появлялись, то исчезали. Такое явление никогда не наблюдалось в опытах, где получались ядра спонтанно делящегося изомера.

**Есть 104-й!** Анализ полученных данных привел к выводу: наблюдаемый эффект в сильной степени зависит от энергии неона. А раз так, необходимо точнее измерять ее величину.

По сравнению с уже преодоленными трудностями было легко повысить точность измерения энергии пучка ионов в циклотроне. Начались решающие опыты. Два месяца почти непрерывной работы. Днем. Ночью. Снята зависимость выхода новых ядер от энергии бомбардирующих плутониевую мишень ионов неона. Точно измерен период полураспада новых спонтанно делящихся ядер. Теперь в каждом опыте четко проявлялись следы спонтанно делящихся ядер с периодом 0,3 секунды. Мы установили, что больше всего новых ядер образуется, когда скорость ионов неона 31 500 *км/сек*.

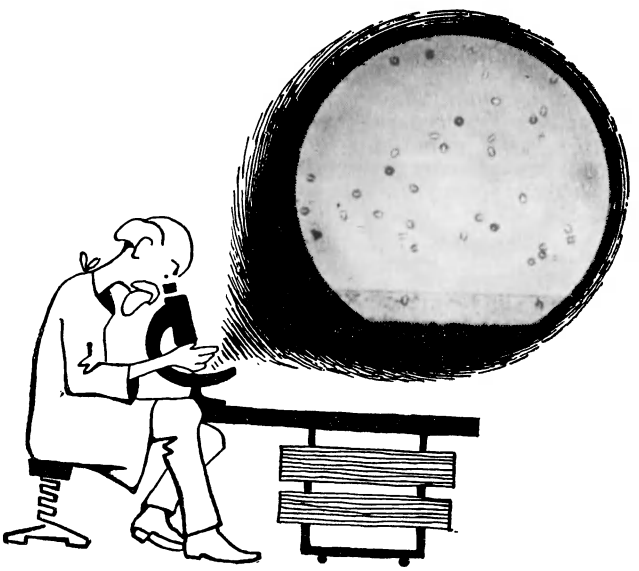


**Рис. 4. Так выглядят треки — следы осколков деления ядер — на стекле после его обработки плавиковой кислотой при увеличении в сто раз.**

Мы знали, что если мишень бомбардировалась 5 часов ядрами неона с такой скоростью, то образуется два новых ядра, если же скорость неона увеличится до 32 000 *км/сек*, за это же время образуется лишь одно ядро 104-го. Такая связь выхода нового ядра со скоростью бомбардирующих ионов неона могла быть, только если синтезировался 104-й. У изученных раньше делящихся спонтанно ядер-изомеров выход убывал с ростом энергии менее резко.

Было поставлено еще несколько контрольных опытов. Все они подтвердили: $104^{260}$ есть!

**Это только начало.** И все? Нет, работа над 104-м элементом только началась. Измерен период полураспада изотопа $104^{260}$. Он оказался таким, что есть надежда изучить химические свойства 104-го.

Пока общепризнано, что свойства 104-го должны совпадать со свойствами гафния. Может случиться, что у нового элемента электронная оболочка застраивается не так, как мы теперь думаем. Это было бы большим вкладом в теоретическую химию.

Наконец, и это, пожалуй, главное, теперь нет оснований опасаться, что время жизни высших трансуранов 105-го и 106-го лежит в области миллиардных долей секунды.

**Зачем нужен 104-й?** Для чего мы изучаем элементы за ураном? Где они применяются? Плутоний-239—лучшее ядерное горючее. Этот изотоп делится нейтронами с малой энергией — «тепловыми нейтронами». Колоссальные запасы урана-238 могут быть переведены в плутоний с помощью специальных реакторов на быстрых нейтронах. Этой энергии человечеству хватит на сотни тысяч лет. Ясны перспективы использования и многих других трансурановых элементов.

В момент открытия нового физического явления иногда сами исследователи не знают, где и как будет применяться их открытие. В 30—40-х годах нашего

века, или, как говорят люди старшего поколения, «до войны», вся ядерная физика считалась большинством ученых отраслью, имеющей лишь научное значение. Считалось, что не менее сотни лет потребуется человечеству, чтобы освоить энергию ядра. А уже через несколько лет работал первый ядерный реактор, вошли в строй атомные электростанции.

В земной коре трансурановых элементов нет. А вот в звездах трансурановые элементы образуются непрерывно в результате ядерных процессов. Изучение свойств высших трансурановых элементов поможет человеку понять многие явления, происходящие в звездной материи.

В будущем, может быть недалеком, высшие трансурановые элементы помогут нам проникнуть в тайны Вселенной. И не последнее место здесь займет изучение изотопов 104-го элемента. Из них первый — $104^{260}$ — синтезирован в Дубне.

■

# СЕМЬ СОСТОЯНИЙ МАТЕРИИ

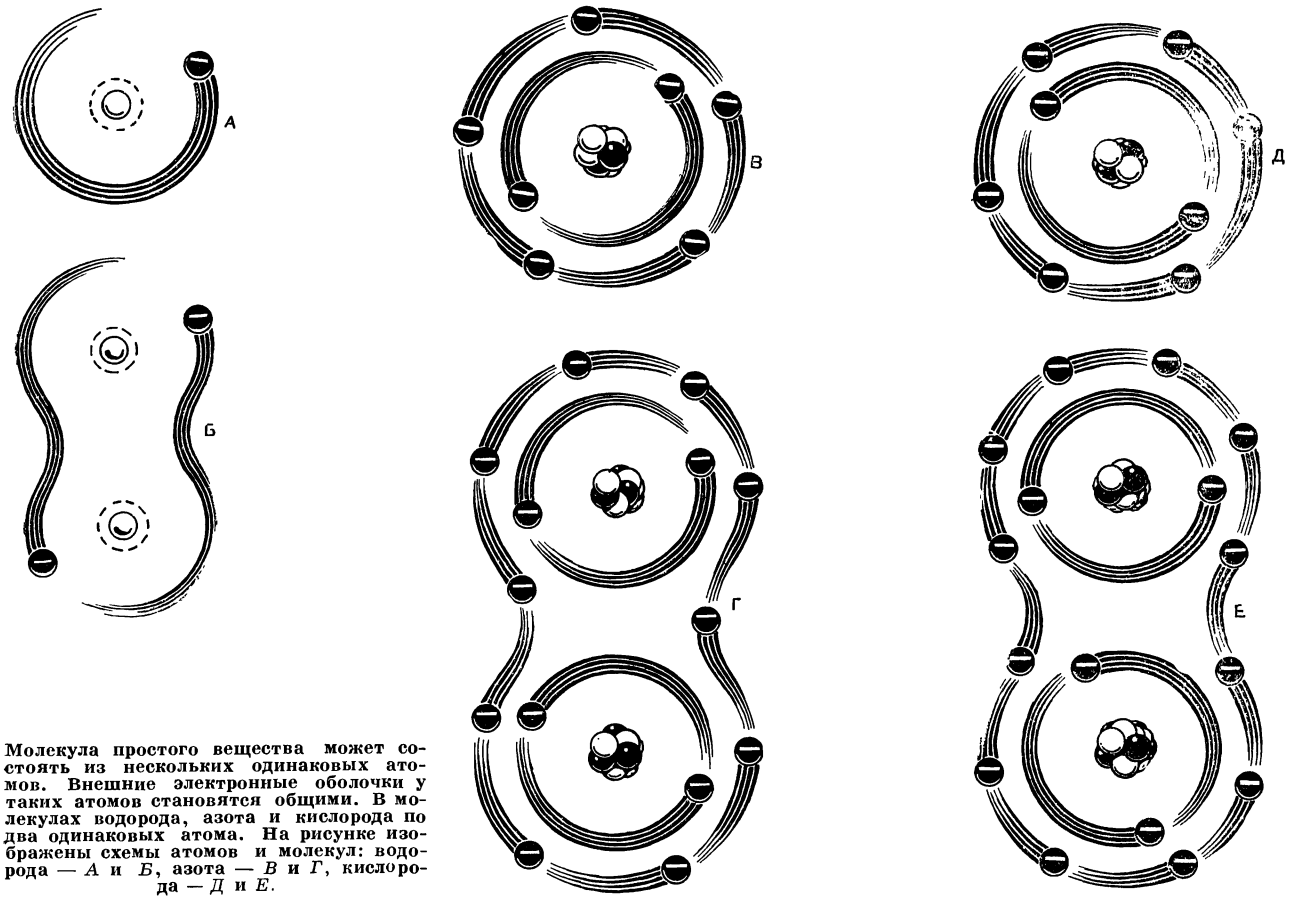
Мы привыкли видеть вокруг себя три состояния вещества: твердое, жидкое и газообразное. Условия, с которыми мы встречаемся на поверхности нашей планеты, кажутся нам обычными. Часто так и говорят: «При обычной температуре вода находится в жидком состоянии, железо — в твердом, а воздух — в газообразном». Но эта температура обычна только для обитателей Земли, да и то не для всех. Для того, кто живет в Арктике, обычное состояние воды — твердое: он имеет дело с водой в виде льда. Если же смотреть на вещи не с нашей узкой, земной, а с космической точки зрения, то на первый план выходят другие, непривычные для нас состояния вещества, которыми наука стала заниматься только в последние десятилетия. Но раньше, чем рассказывать об этих состояниях, взглянем более пристально на уже привычные для нас состояния вещества.

## ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК

Можно определять эти состояния по внешним признакам: твердое тело сохраняет как объем, так и форму; жидкость сохраняет объем, но не сохраняет форму, газ не сохраняет ни то, ни другое. Но правильнее исходить не из внешней формы, а из внутреннего строения вещества. Все вещества состоят из молекул, а молекулы — из атомов. Сложное вещество содержит различные элементы, его молекула обязательно состоит из нескольких различных атомов. Молекула же простого вещества может быть построена из двух или нескольких одинаковых атомов. Так, например, в каждой молекуле азота, кислорода, водорода два одинаковых атома. Но в молекулах инертных газов — гелия, неона, аргона — только по одному атому. Можно сказать, что они состоят из свободных атомов, но эти свободные атомы можно также называть и молекулами. Таким образом, при обычной для нас температуре все тела состоят из молекул.

Состояния вещества с точки зрения молекулярного строения различаются мерой порядка в расположении и движении молекул. Проще всего понять, что такое газ. В нем молекулы располагаются и движутся без какого-либо порядка. Если молекулы сравнить с людьми, то газ подобен беспорядочной толпе перепуганных людей, бегающих в панике по всем направлениям. Противоположность газу — тело, в котором молекулы «выстроились» в строгом порядке, как вымуштрованные солдаты. Такое упорядоченное тело — кристалл. Зная расположение одной частицы в кристалле, можно точно рассчитать, где находится не только соседняя, но и самая далекая частица. Это положение выражают определением: «В расположении частиц кристалла есть **дальний порядок**». Труднее понять природу жидкого состояния. В жидкости каждая частица связана со своими соседями, но только с соседями. Иными словами, в жидкости есть **ближний порядок**, но нет дальнего.

Тепло — это проявление движения молекул. Неподвижными они могли бы быть только при температуре абсолютного нуля. Но ведь в кристалле каждая частица занимает вполне определенное положение. Разгадка в том, что частицы в нем все же совершают колебательные движения. Когда мы говорим о положении такой частицы в кристалле, нужно понимать, что это — положение равновесия, вокруг которого частица колеблется, подобно маятнику. Пока размах (амплитуда) колебаний гораздо меньше, чем расстояние между соседними частицами, общий порядок сохраняется. Если нагреть кристалл настолько, что при своих колебаниях



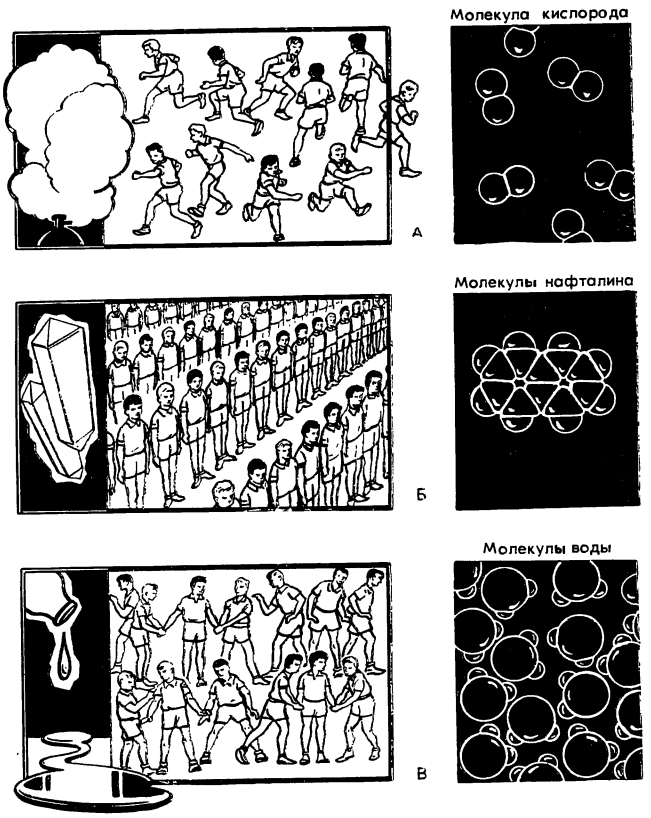

**Молекула простого вещества может состоять из нескольких одинаковых атомов. Внешние электронные оболочки у таких атомов становятся общими. В молекулах водорода, азота и кислорода по два одинаковых атома. На рисунке изображены схемы атомов и молекул: водорода — *А* и *Б*, азота — *В* и *Г*, кислорода — *Д* и *Е*.**

частицы начнут «задевать» друг друга, порядок нарушится, и кристалл расплавится.

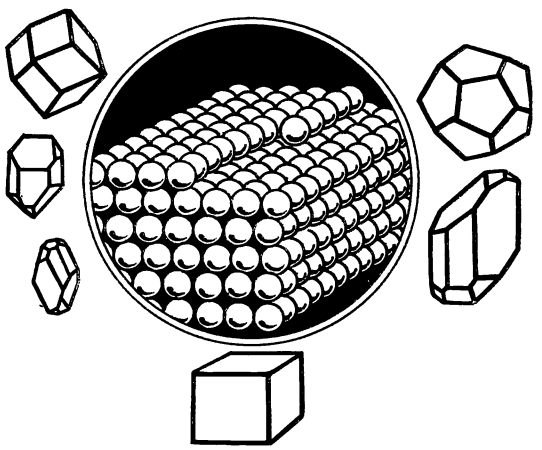
В жидкости движение частиц не ограничено колебаниями, она может течь. Но не всякую жидкость легко заставить течь. Глицерин, деготь, смола текут только под большим напором. Такие жидкости называют вязкими. Им мешает течь то, что каждая частица связана со своими соседями. Строение стекол, пластмасс и других полимеров не кристаллическое. С точки зрения порядка они не отличаются от жидкостей: порядок в них только ближний. Они кажутся твердыми только из-за их большой вязкости. Течь, хотя и очень медленно, может ведь и твердое тело. Ледники в горах постепенно стекают вниз. А лед — тело кристаллическое. Как же отличить истинно твердое тело от очень вязкой жидкости? Иногда говорят даже об особом стеклообразном состоянии вещества, отличая его как от твердого, так и от жидкого. Но если стекло нагревать, оно постепенно и непрерывно становится все более текучим, пока не станет вести себя как типичная жидкость. Отсюда видно, что между стеклом и жидкостью нет точной границы.

У кристаллов же такая граница есть. Каждый кристалл имеет определенную температуру плавления, при которой свойства его резко, скачком, меняются. Существует способ определить, есть ли дальний порядок в расположении частиц вещества — это рентгеноструктурный анализ.

Когда рентгеновские лучи проходят через кристалл, они отклоняются от своего первоначального направления: на фотографической пластинке получаются так называемые дифракционные кольца. В кристалле упорядоченное расположение атомов — и кольца выглядят резкими; чем меньше порядка, тем более они размыты. Стекла, как и жидкости, показывают при таком исследовании только ближний порядок. Таким образом, по внутреннему строению настоящими твердыми телами нужно считать только кристаллические.




**Среди молекул газа (*А*) нет никакого порядка. Молекулы твердого тела (*Б*) подчинены «дальнему порядку» — все молекулы связаны общим «строем». Молекулы жидкости (*В*) подчинены «ближнему порядку» — каждая молекула связана лишь с соседними молекулами.**



**Кристалл образуется в насыщенном растворе вещества. Каждая молекула пристраивается в строго определенном порядке к уже готовой кристаллической решетке. Из каждого вещества образуются кристаллы со свойственной ему геометрической формой.**

## ЧТО ЖЕ ТАКОЕ СТЕКЛО?

Не нужно думать, что под стеклом в науке подразумевается только обычное прозрачное оконное или посудное стекло. В стеклообразном состоянии можно получить многие вещества. Внешними признаками это состояние похоже на твердое (объем и форма сохраняются), но дальний порядок в расположении частиц отсутствует. Исходя же из внутреннего строения вещества, надо считать, что стекло — это жидкость, но настолько вязкая, что это свойство заставляет ее сохранять свою форму. При нагревании вязкость жидкостей уменьшается. Стекло при нагревании становится постепенно все более текучим, пока не приобретет и внешние признаки жидкости. Мы говорим, что стекло «расплавилось». Но в отличие от истинного твердого тела, т. е. кристалла, невозможно точно сказать, при какой именно температуре произошло «плавление» стекла. Свойства его меняются при нагревании постепенно и непрерывно, в отличие от свойств кристалла.

Всякая вязкая жидкость, например глицерин, при сильном охлаждении загустевает и переходит в стеклообразное состояние. Возникает вопрос: а нельзя ли перевести такую жидкость в кристаллическое состояние? Во время Отечественной войны в очень суровую зиму на подъездных путях одного из казанских заводов надолго задержалась цистерна с глицерином. Когда наконец цистерну подали под разгрузку, к великому удивлению работников завода, в ней оказалось какое-то странное кристаллическое вещество, вовсе не похожее на глицерин. Ученые из институтов Академии наук, эвакуированных в то время в Казань, стали исследовать загадочное вещество. Оказалось, что по химическому составу это был глицерин, но только кристаллический. Итак, глицерин закристаллизовался! Затем в старых научных журналах нашли сообщение о подобном же случае, происшедшем много лет назад.

А вот в лаборатории получить кристаллы глицерина никогда никому не удавалось. В чем же здесь дело? Оказывается, все в той же вязкости. Чтобы из жидкости образовался кристалл, ее молекулы должны «выстроиться», как солдаты на параде, в строгом дальнем порядке. Но для этого каждая молекула должна двигаться свободно и найти свое место в этом строю. А вязкость препятствует свободному движению. Если жидкость быстро охлаждать, то вязкость ее возрастет раньше, чем успеют образоваться кристаллы. Жидкость загустеет,

вместо того чтобы закристаллизоваться. Такие жидкости, не перешедшие, несмотря на низкую температуру, в кристаллическое состояние, называют переохлажденными. Чем больше вязкость, тем дольше жидкость может оставаться в переохлажденном состоянии. Воду тоже можно переохладить, но вязкость ее все равно будет невелика, и от любого толчка она закристаллизуется. А вот глицерин слишком вязок, он может оставаться в переохлажденном состоянии годами и все же не закристаллизоваться.

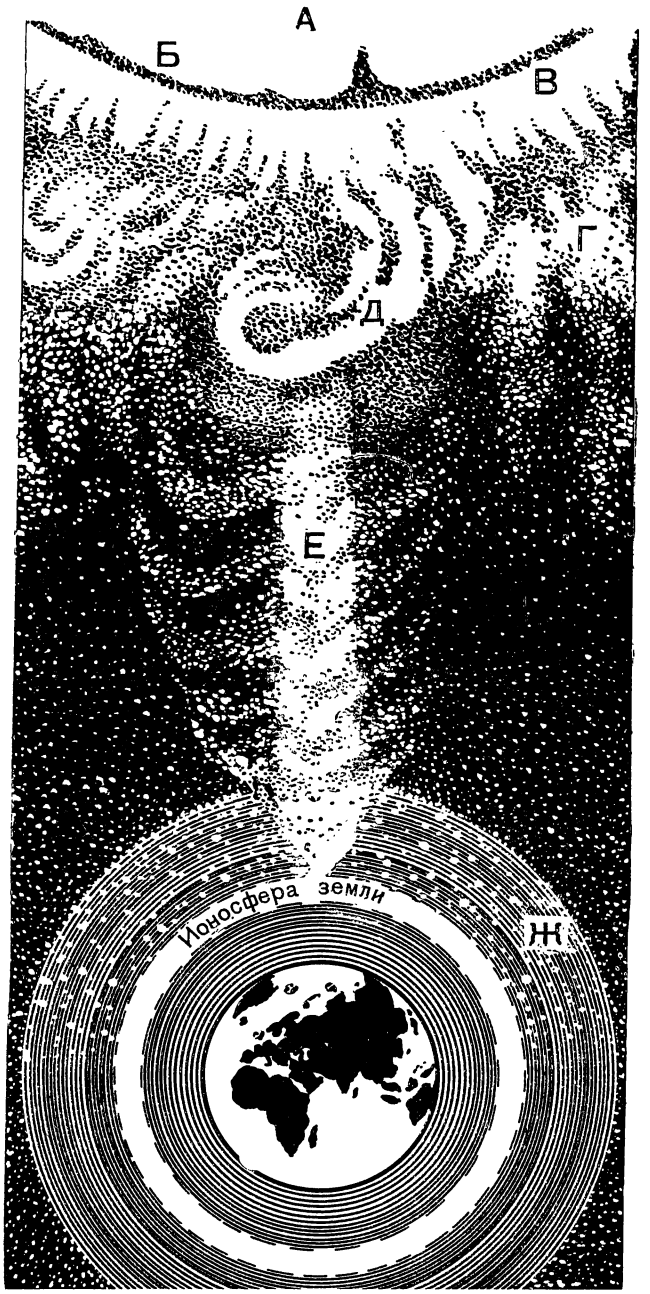
Труднее всего при кристаллизации образоваться первоначальному зародышу кристалла, в котором пока лишь небольшое число молекул расположилось в порядке. Дальше образовавшийся зародыш растет гораздо легче: ведь на его поверхности для каждой следующей молекулы есть уже определенное место, куда ей прикрепляться. Редчайшие случаи кристаллизации глицерина объясняются, видимо, тем, что в середине большой цистерны охлаждение происходило очень медленно (внешние слои действовали как «шуба») и там кристаллические зародыши успевали образоваться раньше, чем вязкость становилась слишком большой.

Ученые и инженеры научились кристаллизовать и обычное стекло. Для этого в расплавленное стекло перед застыванием добавляют вещества, которые легко образуют зародыши кристаллизации (например, окись титана). Получается кристаллическое стекло, которое гораздо прочнее обычного и может заменять не только строительные материалы, но даже и металлы. Такие кристаллические стекла называют ситаллами.

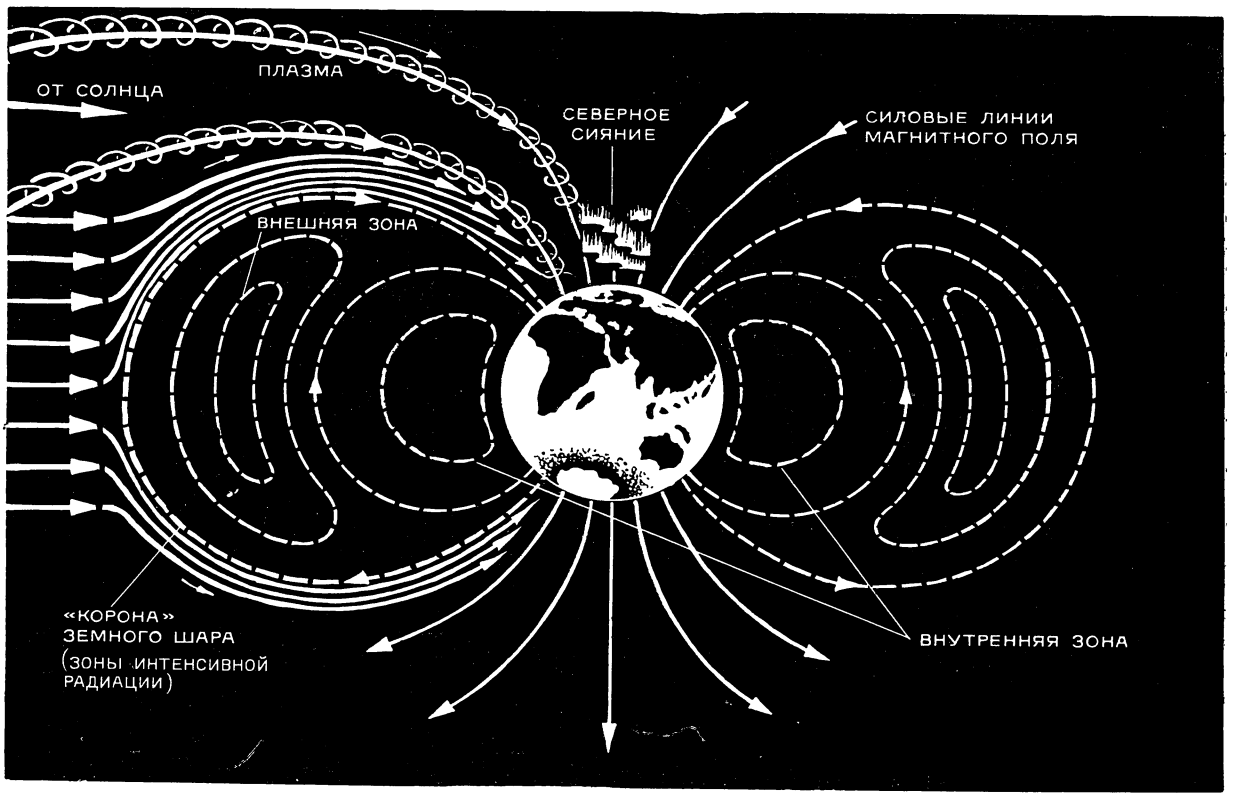
## ПЛАЗМА — ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Пока мы занимались веществом при обычных на поверхности Земли температурах, можно было частицами этого вещества считать молекулы и атомы. Но у атома тоже есть внутреннее строение. Он состоит из ядра, заряженного положительным электричеством, и отрицательно заряженных электронов. Если любое вещество нагревать до очень высокой температуры или пропускать через него сильный электрический ток, его электроны начинают отрываться от атомов. То, что остается от атома после отрыва электрона, имеет положительный заряд и называется **ионом**, сам процесс отрыва электронов от атомов называется **ионизацией**. В результате ионизации получается смесь свободных частиц с положительными и отрицательными зарядами. Эту смесь назвали п л а з м о й.

При отрыве электронов разрываются и все связи, которые удерживают частицы в кристал-




**Солнце (*А*) состоит из раскаленной плазмы. Видимая нами его поверхность — фотосфера (*Б*) — испускает плазменные потоки — хромосферу (*В*). Эти потоки образуют корону (*Г*) и протуберанцы (*Д*). Плазменные потоки распространяются в космическом пространстве в виде ультрафиолетовых лучей (*Е*), которые ионизируют атмосферу нашей планеты (*Ж*). Ионосфера Земли состоит из холодной плазмы.**




**Земля окружена магнитным полем, оно как бы вморожено в слой холодной плазмы (ионосферу) Земли. Выброшенные Солнцем плазменные потоки «ударяются» об этот слой, и он начинает дрожать, как звенящий колокол. Плазма растекается вдоль земного магнитного поля и втекает в более плотную воздушную атмосферу вблизи магнитных полюсов планеты. Так возникает полярное сияние.**

ле или жидкости. Казалось бы, в движении частиц не должно остаться никакого порядка. И действительно, плазма во многом похожа на газ. Иногда ее так и называют—газом из заряженных частиц или **ионизованным газом**. Но самые замечательные свойства плазмы проявляются тогда, когда на нее действует магнитное поле. При этом в движении частиц плазмы появляется некоторого рода порядок и свойства плазмы становятся совсем другими, чем у газа. Поэтому плазму и называют **четвертым состоянием вещества**.

Порядок, который вносит магнитное поле в движение частиц плазмы,— совсем особенный порядок. Его можно назвать винтовым. Заряженная частица может свободно двигаться вдоль направления магнитного поля. Но при этом она быстро вращается вокруг направления магнитного поля. Это вращение происходит по тому же закону, что и в круговом ускорителе заряженных частиц — циклотроне. Поэтому вращение частиц плазмы вокруг направления магнитного поля так и называют—**циклотронным вращением**. Из сочетания свободного движения вдоль поля и циклотронного вращения поперек поля получается винтовое движение частиц плазмы.

Если плазма не слишком плотная, то частицы редко сталкиваются между собой: каждая движется по своему винту. В поперечном направлении такая плазма может двигаться только вместе с магнитным полем. Для наглядности говорят, что магнитное поле как бы вморожено в плазму. Но снаружи магнитное поле не может проникнуть в плазму. Если снаружи возникает сильное магнитное поле, оно давит на плазму с силой, которую так и называют—силой магнитного давления. Отсюда следует, что плазму можно удерживать «магнитной стенкой», толкать «магнитным поршнем». Можно сказать: если вдоль магнитного поля плазма движется как газ, то при движении поперек магнитного поля она приобретает в известной степени свойства твердого тела. На этих свойствах плаз-

мы основаны многие явления природы, которые начинают использоваться и в технике.

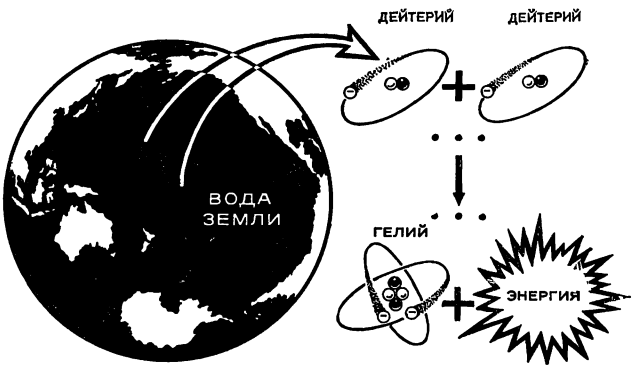
Солнце — громадный шар, состоящий из раскаленной плазмы. С поверхности Солнца непрерывно стекает спокойный поток плазмы — так называемый **солнечный ветер**. Время от времени на поверхности Солнца происходят вспышки. При каждой такой вспышке в космическое пространство «выплескивается» мощный, но кратковременный поток плазмы. Эти плазменные потоки, достигая атмосферы Земли, вызывают в ней много замечательных явлений: полярные сияния, магнитные бури, нарушения радиосвязи. Дело в том, что и Земля окружена плазменной оболочкой, только эта оболочка находится очень высоко. Ведь Солнце наряду с видимым светом посылает во все стороны также и невидимые ультрафиолетовые лучи. Эти лучи воздействуют на атомы воздуха и отрывают от них электроны, т. е. производят ионизацию. Так получается, что верхние слои атмосферы — ионосфера — состоят из ионизированного воздуха, иначе говоря, из плазмы.

Когда великий русский ученый А. С. Попов изобрел радио, думали, что радиоволны должны распространяться, как световые лучи — по прямым линиям. Никто и не предполагал, что радиопередачу можно будет «поймать» на другой стороне земного шара. Казалось, что Земля должна «затенять» свою «обратную» сторону. Но опыт показал другое. Сейчас все знают, что хороший приемник свободно ловит передачи из любого места земного шара. Такую возможность дает именно ионосфера. Плазма, как зеркало, отражает радиоволны. Правда, для этого плазма должна быть достаточно плотной, а волны — достаточно длинными. Короткие волны проникают в ионосферу и там поглощаются. Те, кому приходилось ловить радиопередачи на волнах короче 19 *м*, знают, что ночью эти волны «исчезают»: солнечные лучи перестают действовать, ионы и электроны соединяются в атомы, и плотность плазмы падает.

Кроме плазменной оболочки — ионосферы, Земля окружена еще и магнитным полем. Это поле «вморожено» в ионосферную плазму. Выброшенные Солнцем плазменные потоки «ударяются» об эту «оболочку», состоящую из плазмы и вмороженного в нее магнитного поля, и она начинает «дрожать», как колокол, по которому ударили. Дрожание магнитного поля заставляет дрожать стрелки всех компасов на кораблях и все указатели других приборов, измеряющих направление и силу магнитного поля. Такие беспорядочные колебания земного магнитного поля называют **магнитными бурями.** Они следуют за солнечными вспышками именно через такое время, которое нужно плазменному потоку, чтобы дойти от Солнца до Земли. Ударяя о плазменное «зеркало», отражающее радиоволны, плазменные потоки могут вызывать и нарушения радиосвязи. А после удара солнечная плазма растекается вдоль направления земного магнитного поля и втекает в более плотный воздух вблизи магнитных полюсов Земли, т. е. в полярных областях. Там частицы плазмы сталкиваются с молекулами воздуха и заставляют их светиться. Так возникают красочные **полярные сияния.**

Мы могли здесь рассказать только о немногих, наиболее бросающихся в глаза проявлениях плазмы в космосе. Звезды, газовые туманности, межзвездный и межпланетный газ содержат вещество в состоянии плазмы. Твердое вещество содержат только планеты, их спутники, метеориты и космическая пыль. Если для нас на Земле плазменное состояние кажется необычным, то в космосе это — основное состояние вещества.

Плазма с каждым годом все чаще применяется в технике. В обычной пока электрической лампочке светится раскаленная нить металла. А в газосветных лампах светится плазма, заполняющая стеклянную трубку. Начинают входить в употребление плазменные горелки для сварки и резки металлов. При всяком электрическом разряде в газе образуется плазма. Самый простой тип разряда называется вольтовой дугой. Дуга зажигается, если к двум металлическим электродам приложить достаточное




**Одна шеститысячная часть всей природной воды на Земле — это тяжелая вода. В ней вместо обычного водорода соединен с кислородом дейтерий. При превращении дейтерия в гелий высвобождается большое количество энергии.**

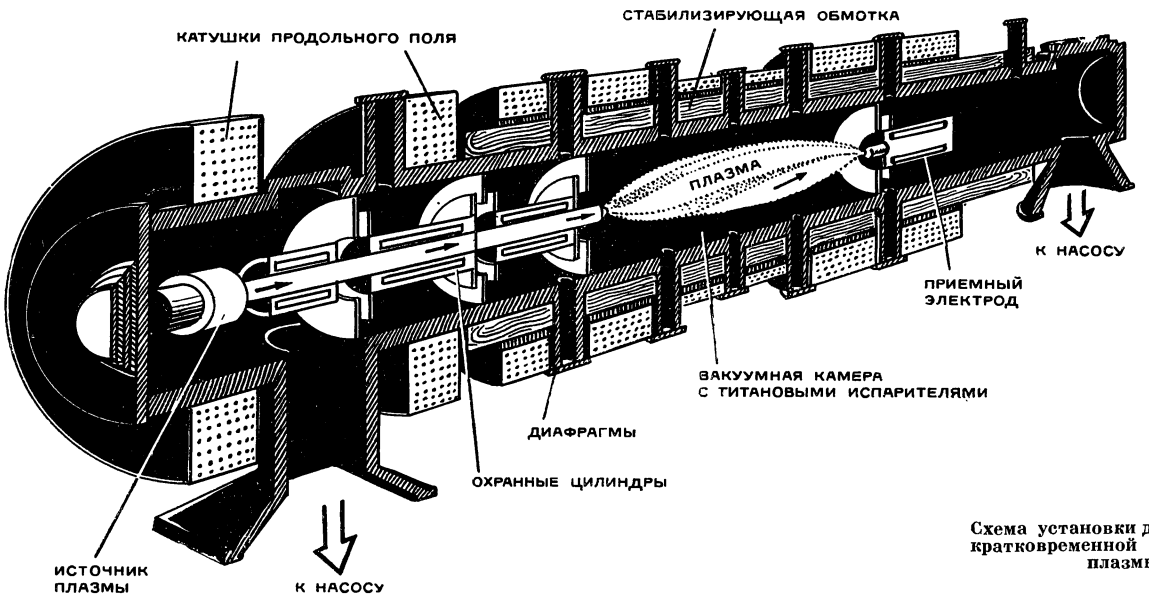



**Схема установки для получения кратковременной раскаленной плазмы.**

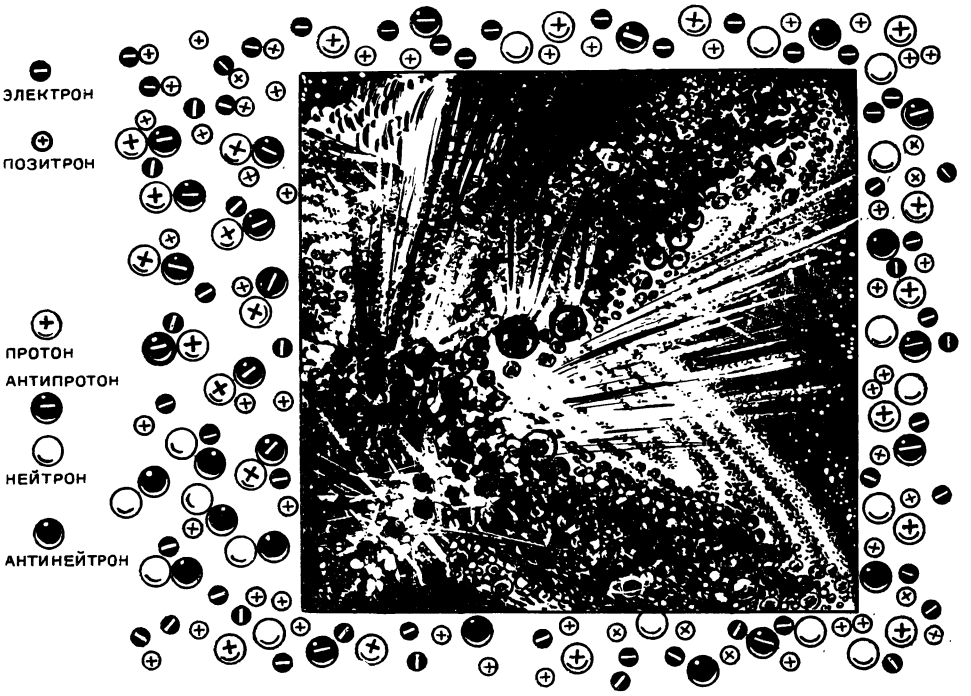
электрическое напряжение, чтобы пробить находящийся между ними газ. Дугу, чтобы она не расширялась (а расширение приводит к охлаждению), как бы сжимают, окружая кольцевой струей холодного газа или водяного пара. В технике все шире применяются сжатые этим способом дуговые разряды. Такие приборы называют **плазмотронами**. Они применяются там, где нужна очень высокая температура, например в химической промышленности и металлургии.

Самое замечательное, чего ждет человечество от плазмы,— это возможность овладеть управляемой термоядерной реакцией. В любой природной воде около одной шеститысячной части тяжелой воды, в которой водород заменен его тяжелым изотопом — дейтерием. Превращение дейтерия в гелий — ядерная реакция с громадным выходом энергии. Но чтобы человек мог управлять этой реакцией, нужно нагреть воду до десятков миллионов градусов. Никакая твердая стенка не выдержала бы такой жар. Вот тут и придут на помощь свойства плазмы. Окружив ее «магнитной стенкой», можно создать условия для управляемой термоядерной реакции. Эта задача еще не решена, но над ней, не жалея сил, трудятся ученые (см. ст. «Сто миллионов градусов»).

## НЕЙТРОННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Четыре состояния, о которых мы говорили, существуют в окружающей нас природе. Но возможны и другие состояния вещества. Они открыты, как говорится, на кончике пера теоретиков. Советский физик Л. Д. Ландау предсказал, что при очень высокой плотности вещества электроны должны как бы вжиматься в протоны атомных ядер: все нуклоны в ядре станут нейтронами, и вещество перейдет в нейтронное состояние. Плотность вещества при этом станет в сотни миллиардов раз больше, чем в тех состояниях, к которым мы привыкли. Астрономы иногда наблюдают яркие вспышки так называемых сверхновых звезд. Предполагают, что такая вспышка — колоссальный взрыв, при котором внешние слои звезды разлетаются, а внутренность сжимается и переходит в нейтронное состояние. На месте взрыва должна остаться крохотная нейтронная звезда. Астрономы усиленно ищут нейтронные звезды; нелегко обнаружить такое маленькое небесное тело. Но ученым известно, какими примерно свойствами должны обладать такие нейтронные звезды. Подсчитано, например, что они должны «светиться» рентгеновскими лучами. Чтобы поймать рентгеновские лучи, нужно посылать приборы на ракетах: через воздух эти лучи не проходят. И вот приборы на ракетах показали, что рентгеновские лучи идут от Крабовидной туманности. А нам известно, что в 1054 г. там, где теперь находится эта туманность, китайские ученые наблюдали появление новой яркой звезды. Предполагается, что там произошел звездный взрыв. Если удастся доказать, что рентгеновские лучи идут не от всей туманности, а от маленького тела внутри нее, тогда можно будет

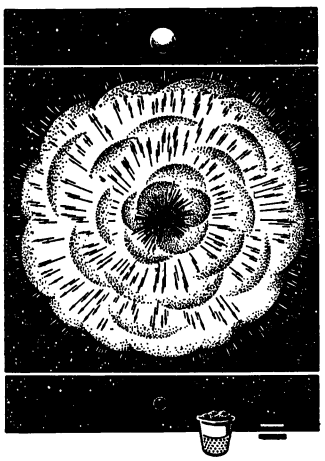
сказать, что действительно в природе обнаружено **пятое, нейтронное состояние вещества.** Пока это еще не доказано; больше того, есть данные, что лучи идут от всего газа. Приходится считать, что пока нейтронное состояние установлено только теоретически.




**Эпиплазма — беспорядочное сгущение частиц и античастиц.**

## АНТИВЕЩЕСТВО И ЭПИПЛАЗМА

Чем больше энергии вложено в вещество, тем более необычайные состояния это вещество принимает. Интересно посмотреть, что же должно произойти при самой большой мыслимой плотности энергии. Ученые предполагают, что при таких условиях любое столкновение частиц вызовет образование пáры. Каждая такая пара должна состоять из частицы и античастицы, которые похожи друг на друга как предмет и его зеркальное изображение, но если у них есть заряды, то заряды эти противоположны. Сначала должны образовываться пàры **электрон — позитрон**, а при еще более высокой плотности энергии—пàры **нуклон —антинуклон** (т. е. протон—антипротон и нейтрон—антинейтрон). Быть может, при каких-либо космических катастрофах получается такая смесь частиц и античастиц. Так как заряды у частиц и античастиц противоположны, то смесь эта должна быть несколько похожей на плазму; ее и назвали эпиплазмой (т. е. сверхплазмой). Пока нет никаких доказательств, что в природе существует эпиплазма. Это — **шестое** возможное **состояние вещества.**



**Астрономы предполагают, что при вспышке так называемой сверхновой звезды внешние ее слои разлетаются в космическом пространстве, а вещество, из которого состояло ядро ее, переходит в нейтронное состояние. На месте взрыва остается крохотная нейтронная звезда.**

## ФИЗИЧЕСКИЙ ВАКУУМ — СЕДЬМОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИИ

Если говорить не только о веществе, а вообще о материи, то в число ее состояний придется включить и пустое пространство. Развитие науки привело к выводу, что пространство обладает определенными физическими свойствами и каждое тело меняет свойства окружающего его пространства. Такое изменение пространства проявляется, например, когда различные тела притягиваются или отталкиваются. Электрические заряды и токи создают вокруг себя электромагнитное поле. Переменное электромагнитное поле распространяется в пространстве как радиоволны, а ведь у них та же природа, что и у света, и у рентгеновских,

и у гамма-лучей. Все это электромагнитные излучения с различной длиной волны. Современная физика пришла к выводу, что не только электромагнитное, но и всякое другое взаимодействие распространяется в пространстве как поле, которое можно считать полем излучения. Строго доказано, что все взаимодействия передаются не мгновенно, а со скоростью света.

Опыт показал, что вещество и излучение — две формы существования материи. Вещество может превращаться в излучение, так же как и излучение в вещество. Можно было бы сказать, что седьмое состояние материи — это излучение. Но оказывается, что излучение — неотъемлемое свойство самого пространства. Пространство не может существовать без излучения. Современное понятие о пространстве далеко от чистой геометрии. Пространство имеет сложные и многообразные физические свойства, и в нем всегда присутствуют «представители» всех возможных типов излучения. Такое пространство, «пустое» только в том смысле, что в нем нет вещества, назвали «физическим вакуумом» («вакуум» означает «пустота»). Это и есть **седьмое состояние материи**. ■

## ТВЕРДОЕ ТЕЛО И ЕГО ЗАГАДКИ

**Кристаллы.** Холодное зимнее небо роняет снежинки. Они невесомо опускаются на вашу ладонь, тают и падают с руки прозрачными шариками — каплями воды. Если взглянуть на снежинку через лупу, обнаружится сказочное явление: шестилучевая звездочка, и каждый луч ее состоит из шестигранных столбиков (по-научному — гексагональных призм). Это кристаллы льда — твердой воды.

Твердое состояние вещества — кристаллическое (см. ст. «Семь состояний материи»). В кристаллах с первого взгляда поражает их правильная форма, у каждого вещества своя. Кристаллы поваренной соли (NaCl) образуют кубы. Кристаллы алмаза — октаэдры, или восьмигранники (см. рис. 1 на цвет. табл. у стр. 376). Кристаллы полудрагоценного камня берилла — гексагональные призмы, торцы которых покрыты тончайшим узором. Не каждый ювелир смог бы воспроизвести такой узор!

**Симметрия.** Основные внешние признаки твердого тела — его правильная кристаллическая форма и плоскогранность. Правильность формы выражена в его симметрии, т. е. в свойстве совмещаться в разных положениях с положением исходным. Если кубический кристалл

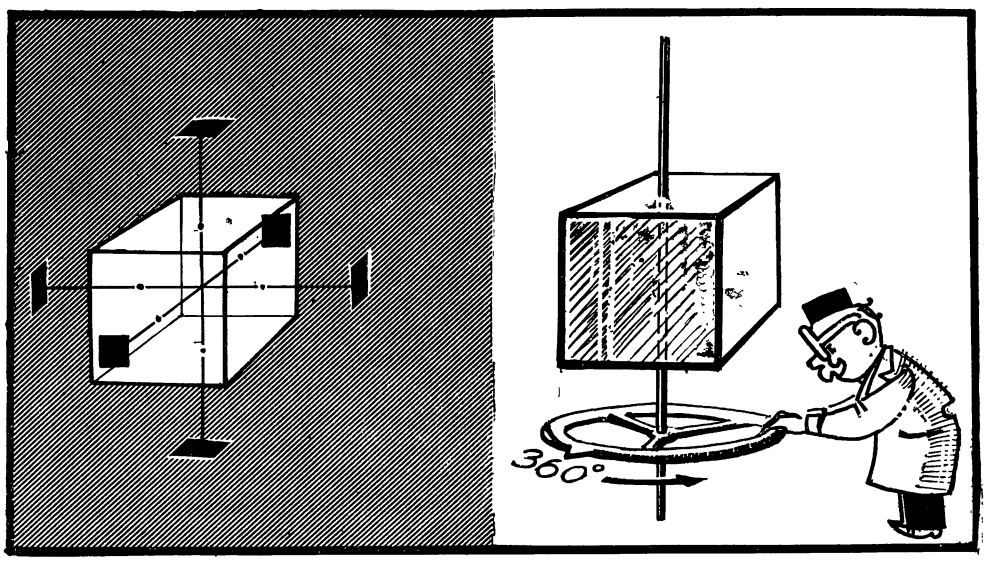



**Рис. 1. У кубичсского кристалла три взаимно перпендикулярные оси. Он обладает симметрией четвертого порядка.**

повернуть на 90° вокруг оси симметрии, проходящей через центры противоположных граней, кристалл совместится с исходным положением. При полном повороте вокруг оси на 360° этот кристалл совместится с исходным положением четырежды (рис. 1). Кристалл NaCl обладает тремя осями симметрии **четвертого порядка** (они показаны на рисунке), четырьмя осями **третьего порядка** (объемные диагонали куба) и шестью осями **второго порядка** (они проходят через центры противоположных ребер).

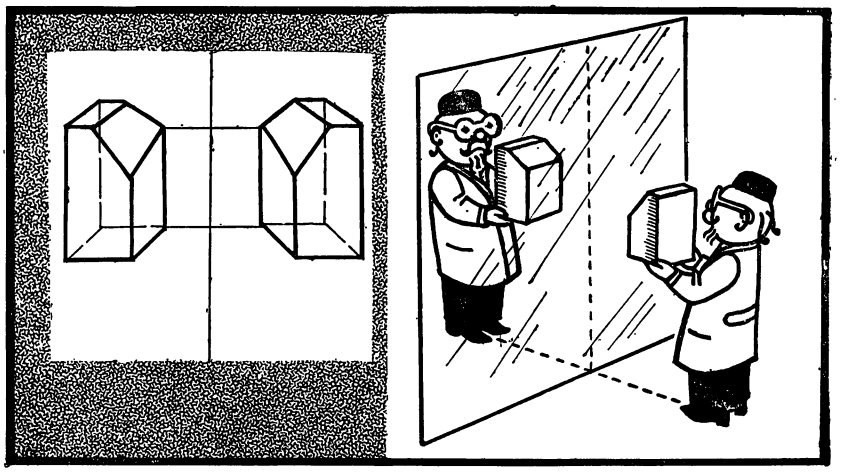


Рис. 2. Плоскость симметрии перпендикулярна плоскости чертежа и делит ее пополам.

Фигура на рисунке 2, или, например, изображение левой и правой перчаток, обладают другой, зеркальной симметрией: левая половина рисунка совмещается с правой, как предмет со своим отражением в зеркале. Вместо оси симметрии здесь существует плоскость симметрии. На рисунке 2 плоскость спмметрии пересекает плоскость рисунка по линии, делящей рисунок пополам, и обе плоскости перпендикулярны друг другу. Плоскости симметрии есть и у кристалла (куба) NaCl.

**Шаровая форма.** Все твердые тела, как бы ни различались они составом и кристаллической формой, будучи расплавлены, переходят в жидкое состояние и стремятся тогда принять одну и ту же форму — форму шара, капли. Шаровая форма типична для жидкости.

Существуют, правда, переохлажденные жидкости, например оконное стекло. Расплавленная стекольная масса при быстром охлаждении не успевает закристаллизоваться. Стекло по внешнему виду — твердое тело, а по внутренней структуре — жидкость. Если его нагреть выше определенной температуры, оно постепенно, а не сразу, как кристалл, превратится в жидкость.

**Монокристаллы и поликристаллические вещества.** Твердое тело может быть монокристаллическим, т. е. состоять из одного-единственного кристалла, или поликристаллическим, т. е. состоять из многих кристаллов, иной раз очень мелких, например в тысячную долю миллиметра. В производстве меди или стали расплав охлаждают быстро и отдельные кристаллики не успевают подрасти. Получается поликристаллическое твердое тело. Металлические предметы, окружающие нас в быту, от вилки до подъемного крана, состоят из поликристаллических веществ. Структуру такого вещества можно увидеть через микроскоп.

Таким образом, поликристаллические вещества состоят из мелких монокристаллов. Но не следует думать, что монокристаллы всегда мелки. В природе нередко встречаются крупные монокристаллы. Они вырастают в результате вековых процессов, протекающих в земной коре. Например, монокристаллы кварца, химический состав которого тот же, что и у речного песка ($SiO_2$), вырастают до десятков сантиметров в поперечнике. В Ленинградском горном институте хранятся монокристаллы кварца, найденные на Урале и на Украине. Высота одного из них 85 *см* и вес 800 *кг*, высота другого 83 *см*, но он менее широк и весит всего полтонны.

В связи с развитием новой техники появилась потребность, например для полупроводниковых приборов, как в мелких, так и в крупных монокристаллах германия, кремния и других веществ. Иногда оказываются нужными кристаллические иглы, нити и даже тончайшие пленки. Все эти «капризы» приборостроительной промышленности удовлетворяются научными лабораториями и специальными заводами.

**Закон анизотропии.** На монокристаллах легко проследить действие одного из важнейших законов природы, относящихся к твердым телам,— закона анизотропии. Суть его в том, что многие свойства в твердых телах зависят от направления, в котором эти свойства измеряются. Например, теплопроводность кристалла, измеренная в различных направлениях, может

оказаться неодинаковой. Она будет одинаковой лишь в параллельных и симметричных направлениях. То же можно сказать об электропроводности, твердости, прочности и других свойствах. Иначе говоря, симметрия внешней формы сопровождается в кристаллах симметрией физических свойств.

Закон анизотропии проявляется весьма наглядно. Из монокристаллов кварца, к примеру, изготовляют пьезоэлектрические пластинки (см. ст. «Звук»). Вырезать их нужно под строго определенными углами к осям симметрии, к граням и ребрам кристалла и для разных назначений пластинки — под разными углами. Ошибся в углах среза—получится бракованный прибор.

Симметрия внешней формы и симметрия физических свойств на первый взгляд кажутся чудом. Они вызваны симметрией внутреннего строения кристалла, т. е. расположением атомов в твердом теле.

**Элементарная ячейка кристаллической решетки.** Исследование методами рентгеновского анализа показало, что правильная форма кристаллов, например кубическая у NaCl, вызвана правильным расположением в пространстве атомов (точнее, ионов, т. е. атомов, несущих положительный или отрицательный заряд: $Na^+$ и $Cl^-$). Их расстояния друг от друга строго равны по трем взаимно перпендикулярным осям.

Наименьшее количество атомов кристалла, сохраняющее при уменьшении его размеров присущую данному кристаллу симметрию, называется элементарной ячейкой. На цветной таблице у стр. 376 (рис. 2) показана элементарная ячейка кристалла NaCl. Ребро ее равно 5,63 Å, расстояние между центрами ионов $Na^+$ и $Cl^-$ равно 2,815 Å.

Из элементарных ячеек слагается кристаллическая решетка твердого тела, состоящая из огромного количества атомов. Атомы (ионы) образуют узлы кристаллической решетки. Промежутки между узлами, «незанятые позиции» называют междуузлиями. В кристаллической решетке NaCl ионы $Na^+$ и $Cl^-$ образуют соответствующие подрешетки натрия и хлора, как бы вставленные друг в друга. На цветной таблице изображены также элементарные ячейки: меди — (рис. 3), графита — (рис. 4) и алмаза — (рис. 5). У каждого атома в решетке меди 12 соседей, в решетке NaCl — 6 соседей, в решетке алмаза — 4. Число соседей называется **координационным числом.** Кристаллическую решетку можно рассматривать как совокупность миллиардов приложенных друг к другу элементарных ячеек.

Так как в решетке NaCl расстояние между ионами равно 2,815 Å, то вдоль 1 *см* вещества (ребро куба) уложилось бы 35,5 млн., или $3{,}55 \cdot 10^7$ атомов. Следовательно, в монокристалле поваренной соли, объем которого равен 1 $см^3$, около $4{,}45 \cdot 10^{22}$ атомов.

Трудно представить себе такое колоссальное количество! Поясним его таким примером. Если бы в сосуд было помещено миллион лет назад $4{,}5 \cdot 10^{22}$ атомов (скажем, гелия) и ежесекундно из этого сосуда вылетал бы в космическое пространство миллион атомов, то за год количество гелия уменьшалось бы в сосуде на $3{,}2 \cdot 10^{13}$ атомов. А за миллион лет оно уменьшилось бы всего на $3{,}2 \cdot 10^{19}$ атомов, т. е. менее чем на одну тысячную первоначального количества ($4{,}5 \cdot 10^{22}$).

**Структура кристалла и закон анизотропии.** Даже в кубической структуре кристалла типа NaCl, в которой расстояния между атомами одинаковы по трем направлениям, в других направлениях (кроме этих трех) свойства кристалла сильно отличаются. Происходит это не только потому, что в других направлениях межатомные расстояния другие, но и вследствие иного распределения сил связи между атомами. Возьмем, например, в кристалле NaCl направление объемной диагонали. Перпендикулярно ей чередуются плоскости, образующие грани октаэдра (см. рис. 2 на цвет. табл.). Каждая из этих плоскостей состоит только из одного типа ионов: из $Na^+$ или из $Cl^-$. Силы притяжения, возникающие между такими плоскостями, в 5 раз больше, чем между плоскостями, параллельными граням куба, в каждой из которых лежат и те и другие ионы: и $Na^+$, и $Cl^-$. Вот почему кристалл NaCl гораздо легче расколоть по плоскостям куба, чем по плоскостям октаэдра. Поэтому же и кристаллизуется поваренная соль, образуя кубы. Непонятная на первый взгляд «прихоть» природы оказывается вполне объяснимой!

У алмаза тоже кубическая решетка. Но атомы углерода предпочитают образовывать октаэдрические кристаллы. Каждый атом в алмазе окружен четырьмя соседями (см. рис. 5 на цвет. табл.). Расстояние между ними строго равно 1,54 Å. Такие короткие связи очень прочны, недаром алмаз — самое твердое природное вещество на Земле. Все четыре связи одинаковы, но, если из алмаза вырезать симметричный куб, количество связей, проходящих через единицу поверхности на грани такого куба, значительно больше, чем на грани октаэдра. Поэтому-то алмаз гораздо легче раскалывается (и

кристаллизуется) по граням октаэдра, а не по граням куба.

В некубических кристаллах закон анизотропии проявляется еще более разительно. На цветной таблице (рис. 4) показана кристаллическая гексагональная решетка графита. Графит, как и алмаз, состоит из атомов углерода. Но атомы образуют в нем не октаэдры, а шестиугольные кольца. В пределах слоя этих колец расстояние между атомами равно всего 1,45 Å. Эти связи очень прочны, прочнее, чем у алмаза. У каждого атома в слое три связи. Четвертая же связь, перпендикулярная слою, очень длинна — 3,35 Å — и потому слаба. Она легко рвется. Графит хорошо расщепляется вдоль слоев решетки и очень мягок. В направлениях, параллельных и перпендикулярных к слоям, в графите резко отличаются не только твердость, но и теплопроводность, электропроводность и многие другие свойства.

**Реальные кристаллы.** В идеальном кристалле, каким мы только что его описали, «дальний» порядок охватывает миллионы миллионов атомов. В тех же кристаллах, которые существуют в природе, т. е. в реальных кристаллах, этот порядок чаще всего нарушен (см. на цвет. табл. рис. 6). В простом веществе, допустим в меди, атомы могли бы занять все узлы решетки только при абсолютном нуле, т. е. при 0 °К. При более высокой температуре атомы переползают из глубины кристалла на его поверхность, оставляя внутри незанятые узлы, «вакансии». Строение такой решетки называется «структурой Шоттки». При еще более высокой температуре атомы просто смещаются с узлов в междуузлия — образуется «структура Френкеля». Атомы примесей могут проникнуть в кристалл и занять места в свободных узлах. Такое построение называется структурой замещения. Могут они поместиться и в междуузлиях, тогда возникает структура внедрения.

В химических соединениях или сплавах их компоненты могут образовывать между собой структуры замещения. При повышении температуры все больше атомов одного компонента проникает в позиции второго компонента и, наоборот, атомы второго компонента — в позиции первого. Беспорядок в кристаллах усиливается.

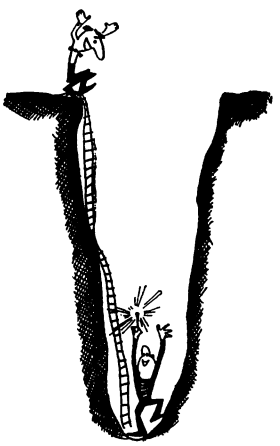
Все эти нарушения правильной структуры кристаллов в отдельных узлах или междуузлиях называются **точечными дефектами.** Они очень влияют на механические, электрические и другие свойства кристаллов. Кроме точечных дефектов, в твердых телах и стеклах возникают и **протяженные дефекты,** которые также отражаются на многих свойствах вещества, например на прочности (трещины, сдвиги слоев и др.).

**Механическая прочность тела.** Железная проволока сечением в 1 $мм^2$ разрывается силой тяжести в 100 *кг*. У стеклянной нити того же

## «Стешевит» из «Каньона дьявола»

Радиус планеты Земля 6378 *км*. Живущий на ней человек изучил только самый верхний слой — тончайшую пленочку земной коры толщиной всего 6—7 *км*. Что делается глубже, пока еще неизвестно. Плотность горных пород земной коры 2,5—3,0 $кг \cdot м^3$. Плотность всего земного шара изучили астрономы и физики, она оказалась 5,5 $кг \cdot м^3$. Из чего же состоит Земля? Почему она такая тяжелая? Может быть, средняя плотность земного шара потому так велика, что на большой глубине под действием немыслимо огромного давления возникают из тех же элементов, которые на поверхности земного шара образуют земную кору, новые удивительные соединения, новые материалы, обладающие большой плотностью.

Решить эту задачу взялся молодой советский ученый Сергей Стешев. Всем хорошо известен обычный кварц. В его кристаллической решетке вокруг каждого атома кремния расположены четыре атома кислорода. Стешев подверг кварц давлению в 150 тыс. *атм* при температуре 1500° Ц. Эти условия соответствуют глубине всего в 400 *км*. После трудной и длительной работы Стешев получил всего несколько крупинок загадочного минерала. Такого минерала никто никогда на Земле не видал. Составом он не отличался от кварца, но его плотность оказалась 4,35 вместо 2,65 $кг \cdot м^3$. Такую большую плотность имеют нижние слои земной мантии.



Знаменитый «Каньон дьявола» в Америке — гигантский кратер, который образовался от взрыва некогда столкнувшегося с Землей огромного метеорита. Американские ученые, узнав об опытах Стешева, решили проверить, не мог ли возникнуть при ударе метеорита о Землю в «Каньоне дьявола» удивительный минерал, полученный искусственно в Академии наук СССР 23-летним советским ученым. В породах, образовавшихся при взрыве метеорита, ученые нашли тяжелый кремнезем. Он полностью совпадал с тяжелым кварцем, созданным в Москве Стешевым. Американские ученые предложили назвать новый минерал, найденный в «Каньоне дьявола», в честь его первооткрывателя «стешевитом».

сечения сопротивление может быть разным; допустим, что оно 10 *кг*[3] (в среднем). Можно ли считать, что это подлинная прочность стекла? Советские ученые доказали, что если вместо одной толстой стеклянной нити сечением в 1 *мм*$^2$ взять стеклянное волокно, допустим, из 1000 нитей с сечением у каждой в 0,001 *мм*$^2$, то прочность такой составной нити будет уже 100 *кг/мм*$^2$, т. е. сравняется с прочностью железной проволоки.

Причина такого загадочного явления оказалась прежде всего в . . . трещинах. Если однаединственная крохотная трещина возникнет в волокне с сечением в 1 *мм*$^2$, то под действием нагрузки эта трещина начнет быстро удлиняться, пока волокно не лопнет. Если та же трещина возникнет в одном из волокон нити, состоящей из 1000 тончайших волоконец, то это волокно также лопнет, но другие 999 волокон останутся неповрежденными и стеклянная нить выдержит нагрузку.

Это замечательное явление уже используется в технике. Стеклянное волокно, склеенное пластмассой,— прочный материал «стеклопластик». Из него можно делать детали машин, не менее прочные, чем из стали, но гораздо более легкие. Многим любителям рыбной ловли уже известны великолепные удилища из стеклопластика. Они легки и очень прочны.

Такое свойство реальных кристаллов и стекол открывает перед техникой практические, очень важные перспективы:

1. Если нужно резко повысить прочность твердого тела, не обязательно создавать новое вещество. Устранив дефекты, можно во много раз повысить прочность уже известного вещества. Советские ученые давно доказали такую возможность.

2. Чтобы понизить прочность твердого тела и тем самым облегчить его помол (дробление), можно ввести в него так называемые поверхностно-активные вещества, которые проникают по трещинам в глубь кристалла и значительно облегчают его раскалывание. Это также доказали своими исследованиями советские ученые — П. А. Ребиндер и др. (см. ст. «Замечательные явления на границах между телами»).

**Удивительные свойства полупроводников.** Много веков известны человечеству металлы. Из них изготовлялись машины, оружие, утварь. В прошлом веке открыли возможность передавать на многие тысячи километров электрическую энергию, т. е. поток электронов. Металлы, например серебро, медь и алюминий, оказались превосходными проводниками электричества. Электрические провода изготовляются сейчас из меди и алюминия, а для очень точных приборов — и из серебра.

Для электропередач, кроме проводов, потребовались и изоляторы, например слюда, фарфор. Такие материалы называют диэлектриками. Они практически не проводят ток и препятствуют его потерям в электрической сети. Но существует много веществ, промежуточных по электропроводности между металлами и диэлектриками. Они и проводники плохие, и изоляторы негодные. Их назвали полупроводниками. До второй четверти нашего века они не вызывали особый интерес. А сейчас нет школьника, который не слыхал бы о фантастических свойствах полупроводников (см. ст. «Полупроводники»).

Полупроводники способны непосредственно превращать энергию нагретых тел и даже энергию солнечного луча в энергию электрическую. Полупроводники позволяют сильно уменьшить размеры многих приборов. Например, электронно-счетная машина совсем еще недавно занимала целый зал. Машина с такими же возможностями, построенная на полупроводниках, может быть помещена в чемодане. Мотор-генератор, превращающий переменный ток в постоянный, весит полтонны, а полупроводниковый выпрямитель тока такой же мощности — всего полкилограмма.

О многочисленных применениях полупроводников подробно рассказано в статье «Полупроводники». Все эти богатейшие для техники возможности кроются в крохотных кусочках твердых или стеклообразных тел, обладающих свойствами полупроводников.

**В чем сущность свойств полупроводника?** Почему, например, металл свинец не может заменить в технике своих соседей по четвертой группе периодической системы — полупроводники германий и кремний?

Различие между металлами, полупроводниками и диэлектриками вызвано тонкими деталями в строении атомов и особенностями энергетических уровней в твердых телах. Атом любого элемента состоит из положительно заряженного ядра и окружающих ядро электронов. Число электронов в атоме равно порядковому номеру элемента в периодической системе. Электроны расположены в оболочках, на у р о в н я х, строго определенных для каждого элемента. Число электронов для каждого уровня строго ограничено. Между уровнями — «запрещенные» для электронов области. Электрон может при определенных условиях «соскочить» со своего уровня, но тогда он должен пе-

рейти на соседний уровень. Механизм электронных перескоков в атомах любых элементов один и тот же: переход с уровня, более близкого к ядру, на более дальний требует затраты строго определенного количества энергии — кванта энергии (+E); при обратном переходе выделяется такой же квант энергии (—E).

Когда твердое тело образуется, происходит сближение атомов. Одинаковые уровни в миллиардах атомов влияют друг на друга, эти уровни чуть-чуть смещаются, и в твердом теле возникает полоса, или зона уровней. Если самая внешняя зона заполнена электронами (тогда ее называют валентной), то перемещение электронов в электрическом поле невозможно, так же как и перемещение пассажиров в битком набитом трамвае. Следовательно, невозможна и электропроводность. Если же валентная зона перекрыта (рис. 3) зоной, в которой электронов нет или их мало (зона проводимости), то электроны валентной зоны легко переходят в зону проводимости и могут там перемещаться в электрическом поле (электронная проводимость). Электроны, оставшиеся в валентной зоне, приобретают заметную способность передвигаться в определенном порядке, который называется дырочным механизмом.

Электрические свойства твердого тела зависят от разности энергий валентной зоны и зоны проводимости. Если зона проводимости и валентная зона взаимно перекрываются — это металл (см. рис. 7 на цвет. табл. у стр. 376); если зоны не перекрываются и энергетический разрыв $\Delta E$ (запрещенная зона) между валентной зоной и зоной проводимости невелик — это полупроводник; если зоны не перекрываются и энергетический разрыв $\Delta E$ велик — это диэлектрик.

Когда валентная зона и зона проводимости не перекрываются, электрон, чтобы перескочить через запрещенную зону, должен получить квант энергии $\Delta E$, например, за счет теплового движения атомов или за счет действия света. В валентной зоне, когда из нее уходит электрон $e^-$, остается положительно заряженная «дырка» $e^+$. В зоне проводимости электроны $e^-$ движутся в электрическом поле к аноду, т. е. к положительному электроду. Это электронная проводимость. Электроны валентной зоны перескакивают на свободные места (на положительные «дырки») и также передвигаются к аноду, оставляя за собой «дырки». Этот процесс удобнее описать так, что «дырки» $e^+$ движутся к отрицательному электроду — к катоду. Поэтому такой

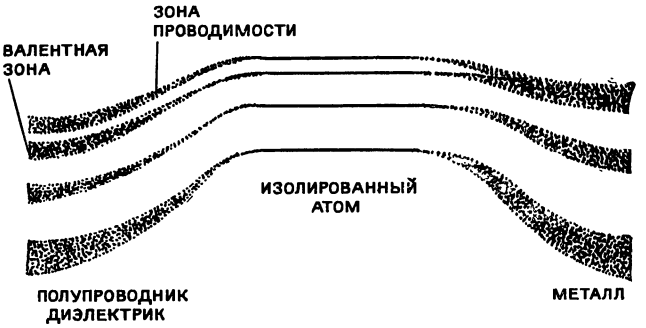



Рис. 3. Образование энергетических зон при сближении атомов.

процесс и назван дырочной проводимостью. Сумма обоих процессов — электронной и дырочной проводимости — определяет электропроводность чистейшего полупроводника.

Когда температура полупроводника повышается, из валентной зоны все больше и больше электронов переходит в зону проводимости. В 1 $см^3$ чистейшего германия $4 \cdot 10^{22}$ атомов; при комнатной температуре из валентной зоны переходит в зону проводимости только $10^{13}$ электронов, т. е. 1 электрон на $4 \cdot 10^9$ атомов. При температуре 300° Ц такой переход совершают уже $10^{17}$ атомов, т. е. в 1000 раз больше. Электропроводность Ge очень быстро растет при повышении температуры.

Аналогично ведет себя полупроводник, когда на него падает свет, если энергия светового кванта достаточна для перескока одного электрона.

В обыкновенном дверном звонке электрическая цепь разомкнута. Нажимая пальцем кнопку, вы соединяете эту цепь, и сигнализация начинает работать. Если в разрыве цепи поместить не кнопку, а пластинку полупроводника, прибор становится автоматическим. При комнатной температуре и в темноте сопротивление в такой цепи очень велико и ток через полупроводник не идет. Но если полупроводник хотя бы незначительно нагреется (например, когда вблизи возник пожар), его электропроводность сильно возрастет, и звонок поднимет тревогу. Можно сконструировать и прибор, который автоматически включит противопожарные устройства.

Если луч света, падающий на полупроводник, периодически прерывается проходящими мимо людьми, электропроводность полупроводника то возрастает (освещение), то падает (тень). И полупроводник будет автоматически включать и выключать счетчик. Прибор точно

сосчитает, сколько людей прошло. Так устроены на многих производствах автоматические счетчики для регистрации сходящих с конвейера готовых деталей.

**Примесная электропроводность.** Если полупроводник не чистый и в нем есть какая-то незначительная примесь, которую даже невозможно определить обычным химическим анализом, физики говорят, что в нем «следы примеси». Свойства полупроводника со следами примеси уже иные, чем у чистого. Возьмем, например, полупроводник Ge со следами As. У атома As 5 внешних электронов (это элемент 5-й группы периодической системы), а у тома Ge 4 внешних электрона. Лишний электрон в валентной зоне не нужен, так как все места в атомных связях заняты. В таком полупроводнике возникает около зоны проводимости «донорный», т. е. отдающий электроны, примесный уровень (см. рис. 7 на цвет. табл. у стр. 376). Энергетический разрыв $\Delta ED$ между зоной проводимости и примесной зоной очень мал, электрону примесного уровня нужно придать очень мало энергии, чтобы он мог перескочить в зону проводимости. При комнатной температуре каждый атом As отдает в зону проводимости 1 электрон. Допустим, что в этом полупроводнике 1 атом As приходится на $10^8$ атомов Ge. Следовательно, в 1 $см^3$ на $4 \cdot 10^{22}$ атомов $4 \cdot 10^{14}$ атомов As. Уже при комнатной температуре в зоне проводимости окажется $4 \cdot 10^{14}$ электронов, т. е. в 40 раз больше, чем в беспримесном полупроводнике. Полупроводник с донорным примесным уровнем называется электронным и обозначается буквой $n$, например $n$-Ge.

Следы примеси галлия придают германию уже совсем другие свойства. В валентной оболочке галлия всего 3 электрона. Следовательно, в каждой связи не хватает одного электрона в результате замены атома Ge на атом Ga. В валентной зоне такого полупроводника образуются положительные дырки, а в запрещенной зоне появляется акцепторный, т. е. принимающий электроны, уровень. Перескок электрона из валентной зоны на акцепторный уровень также требует ничтожную затрату энергии. Он происходит уже при комнатной температуре. Такой примесный полупроводник называется дырочным и обозначается буквой $p$, например $p$-Ge. Примесь 1 атома галлия на $10^8$ атомов германия вызывает высокую дырочную электропроводность.

Ученые и инженеры, комбинируя электронные и дырочные полупроводники, создают многочисленные «чудодейственные» приборы.

**Загадка термоэлектрогенератора.** Если привести в соприкосновение электронный и дырочный полупроводники и нагреть место их соединения, то на холодном конце электронного полупроводника сгруппируются электроны $e^-$, а на холодном конце дырочного полупроводника — дырки $e^+$. Такая пара полупроводников называется термоэлектрогенератором. Соединив холодные концы полупроводников проводом, можно получить ток. Это легко обнаружить, нагрев место соединения полупроводников и включив электролампочку в цепь.

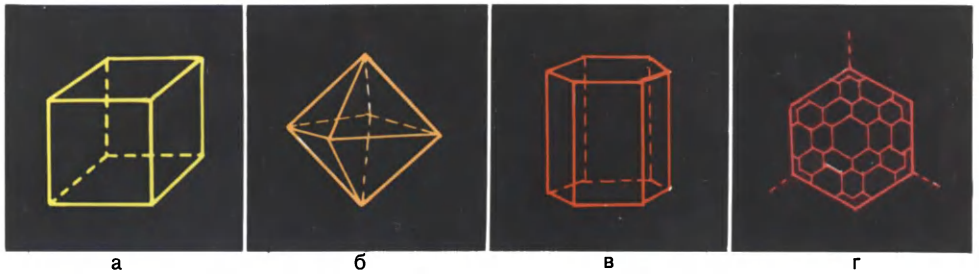
**Полупроводниковый выпрямитель тока.** Если ввести в полупроводник различные примеси, можно получить в нем области — электронную и дырочную. В таком полупроводнике образуется пограничный слой между этими областями. Пограничный слой иногда называют $p$-$n$-переходом. Он позволяет использовать полупроводник как выпрямитель тока. Когда к дырочной области (+области) подключен анод (+электрод), а к электронной области (—области) подключен катод (— электрод), то ток, естественно, легко проходит через полупроводник (пропускное направление). Но если к +области подключить —электрод, а к —области подключить +электрод, то заряды оттекут от $p$-$n$-перехода к противоположно заряженным электродам и ток через полупроводник почти не сможет проходить (запорное направление). Движение электронов и положительных дырок через цепь регулируется $p$-$n$-переходом с огромной скоростью

В одном и том же полупроводнике можно поместить два и более $p$-$n$-переходов. Это позволяет создавать транзисторы. Такие транзисторы — основная действующая часть крохотных радиоприемников, легких переносных телевизоров и других замечательных приборов.

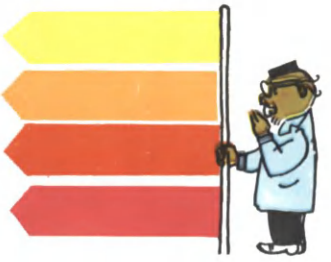
*Таблица к статье «Твердое тело и его загадки»*

*1.* **У кристаллов различных веществ различная геометрическая форма: *а* — у поваренной соли — куб; *б* — у алмаза — октаэдр, *в* — у берилла — гексагональная призма; *г*—торцы кристалла берилла покрыты сложным узором. *2.* У каждого атома в кристалле поваренной соли шесть соседей, они расположены по трем взаимно перпендикулярным осям. *3.* В кристалле меди у каждого атома двенадцать соседей. *4.* Кристаллическая структура графита. *5.* Структура алмазного кристалла. *6.* Различные структуры реальных кристаллов: *а* — структура Шотки, атомы переползают из глубин кристалла на поверхность, оставляя внутри незанятые узлы; *б* — структура Френкеля, атомы смещаются из узлов в междуузлия; *в* — структура замещения, атомы примеси проникают в кристалл и размещаются в узлах; *г* — структура внедрения примеси в междуузлия; *д* — сложная структура взаимозамещения *А* на *В* и *В* на *А*; *е*—структура вычитания; некоторые узлы остаются вакантными. *7.* Схема уровней в полупроводниковом материале с примесями.

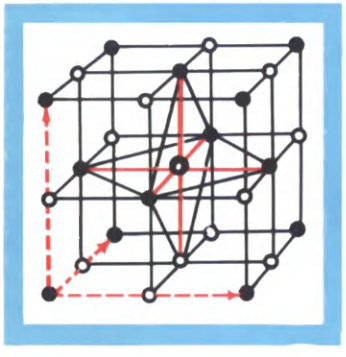
1



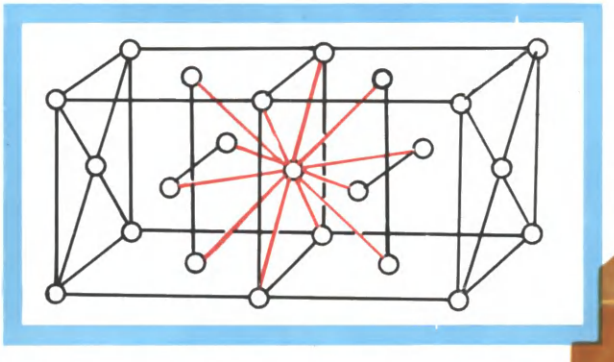
а б в г



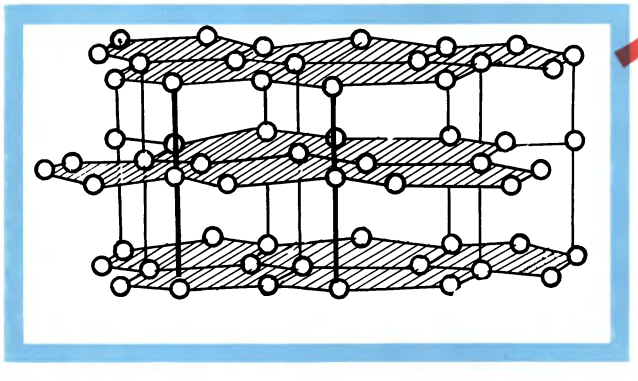
2



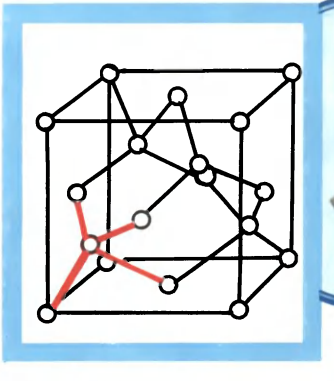
3



4

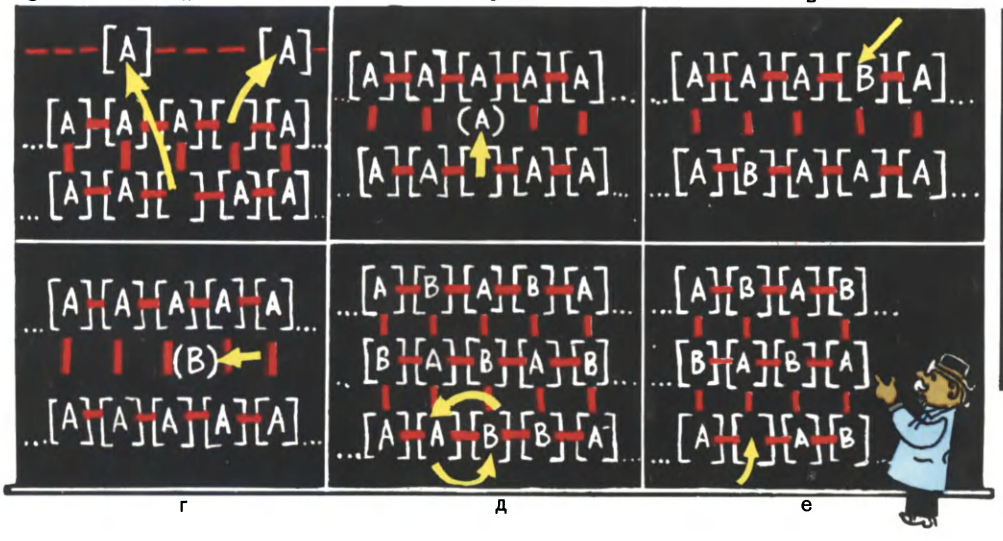


5



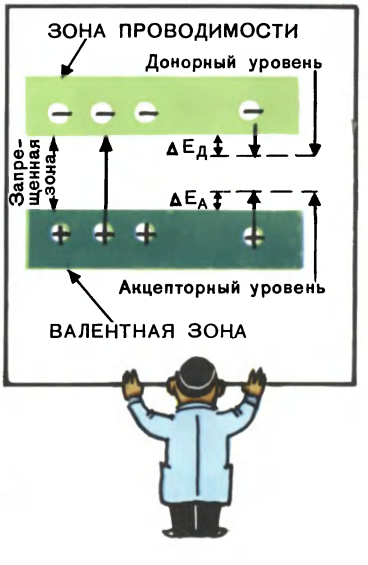
6

а б в

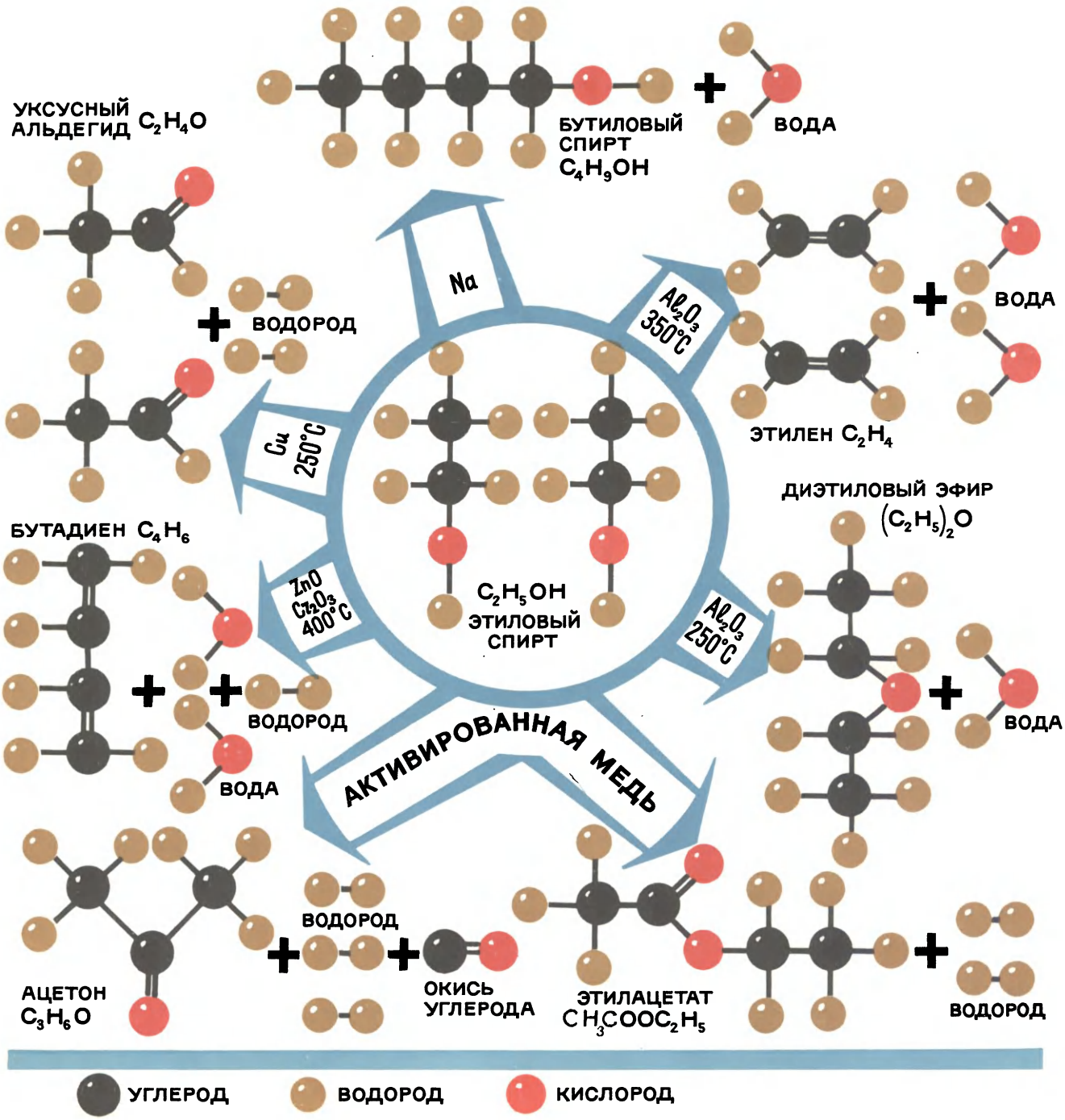


г д е

7



# ВЛИЯНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ НА ХОД РЕАКЦИИ



**Главная загадка примесных полупроводников.** Свойства твердых тел определяются их химическим составом и строением элементарных ячеек. Но за последние десятилетия выяснилось, что закон постоянства состава («где бы и как бы соединение ни получалось, его состав и свойства всегда одни и те же») для твердых тел иногда неприменим. Например, в сульфиде свинца PbS на атом Pb не обязательно приходится один атом S, а формулу сульфида свинца правильнее было бы понимать как соотношение Pb и S между $Pb_{0,9995}S$ и $PbS_{0,9995}$. Если тело — полупроводник, как в данном случае, то даже ничтожные отклонения индексов Pb и S в сторону недостатка серы или свинца влекут за собой резкие изменения электропроводности и других физических свойств (иногда в миллионы раз!). Меняется и знак проводимости. Недостаток серы ведет к образованию электронного, а недостаток свинца — дырочного сульфида свинца. Мы столкнулись здесь с неожиданным и важным явлением: в основном составе полупроводника не только присутствующие, но и отсутствующие атомы влияют на его полупроводниковые свойства так же сильно, как и ничтожные следы примесей. Этот загадочнейший на первый взгляд факт вызван тем, что в твердом теле разнородные атомы частично ионизированы, т. е. несут на себе тот или иной заряд: например, $Pb^{n+}$ $S^{n-}$. Если из решетки кристалла испарить даже следы свинца, то +заряд, который был на этих атомах, останется в кристаллах, например на вакансии, оставленной испарившимся атомом. Эти +заряды, условно связанные с вакансиями, совершенно аналогичны акцепторному дырочному уровню и резко увеличивают электропроводность. Если испарить следы серы, то —заряды останутся на вакансиях серы и будут вести себя аналогично электронному донорному уровню, электропроводность также резко возрастет. В полупроводниках ничтожные концентрации точечных дефектов, вызванные структурой вычитания, т. е. нехваткой части атомов (см. рис. 6 на цвет. табл.), влекут за собой исключительно важные научные выводы и технические возможности.

* * *

Мы коснулись здесь только некоторых из многочисленных загадок твердого тела, которые уже раскрыты пытливым умом исследователей. На пороге знаний — новые загадки и новые открытия.

■

**Образование есть то, что остается, когда все выученное уже забыто.**

* * *

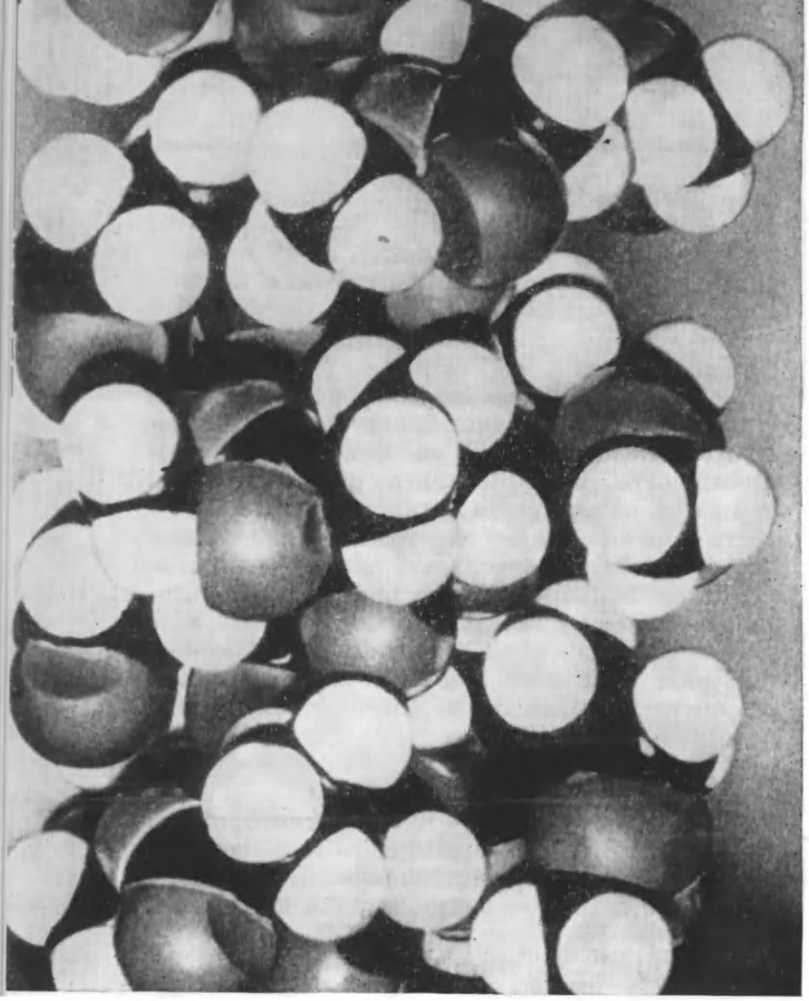
**Луи Пастер: «Не всякому помогает случай. Судьба одаривает только подготовленные умы».**

* * *

**Математические методы исследования часто открывали перед физиками неожиданные горизонты. Напомним фразу великого французского математика Анри Пуанкаре: «Уравнения стали умнее тех, кто их выводит».**

*Таблица к статье «Химическая реакция»*

**Удивительное свойство катализаторов — их избирательность. Одно и то же исходное вещество — спирт — с помощью различных катализаторов можно превратить в вещества с различными свойствами и строением.**



# ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

## ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Если бы вы захотели пересчитать все известные химические соединения, то это заняло бы неимоверно много времени. Одних только соединений углерода насчитывается около двух миллионов. Среди них есть такие сложные, что химическая формула любого из них с трудом могла бы уместиться на этой странице.

Чтобы получать огромные молекулы, состоящие из сотен и тысяч атомов разных элементов, химики изучили соединения простые и простейшие; узнали, какие именно элементы и в каком количестве в них содержатся.

Еще никто не знает, сколько разных минералов существует на Земле. Химические элементы могут образовать в природе самые разнообразные сочетания. Есть, например, минералы, в которых содержится сразу несколько десятков элементов таблицы Менделеева: одни в большем, другие в меньшем количестве, третьи в виде чуть приметных следов. Но химик точно знает, сколько именно этих элементов заключено в кристаллах минерала; десятые и сотые доли процента примесей не ускользнут от его внимания.

Из чего состоит то или иное вещество, сколько чего в нем содержится — вот вопросы, на которые дает ответ химический анализ. Из всех химических наук аналитическая химия, пожалуй, самая древняя наука и, можно добавить, очень нужная. Ученый может получить новое соединение, но без знания методов химического анализа он не сможет определить, какие элементы и в каком количестве входят в его состав. Он может обнаружить минерал, но ему будет неясно, новый ли это минерал или уже известный.

Химический анализ — первый помощник специалистам самых разных отраслей науки. Исследуя спектры небесных светил, астрофизик узнает, какие именно элементы и в каких количествах содержатся в звездах. Из богатого арсенала аналитических методов он чаще всего пользуется спектральным анализом. Металлургу химический анализ необходим при выплавке сталей и чугунов. С огромной пользой аналитической химии согласится и агроном. Ему важно знать, какие именно удобрения следует вносить, чтобы улучшить урожай. А для этого прежде всего следует изучить состав почвы. Археологу химический анализ поможет установить, например, из какого сплава изготовлено старинное металлическое украшение.

Количество аналитических методов очень велико, и оно постоянно увеличивается. Рассмотрим лишь некоторые из них.

## ВСЕ ЦВЕТА РАДУГИ

Оказывается, многие элементы образуют окрашенные химические соединения. Они дают, как говорят химики-аналитики, характерные цветные реакции.

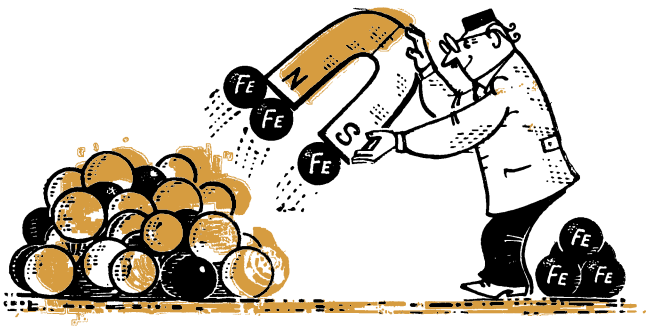
Предположим, что мы взяли несколько стаканчиков и в первый из них налили раствор медного купороса $CuSO_4$ (сернокислой меди), во второй — хлорного железа $FeCl_3$, в третий — азотнокислого алюминия $Al(NO_3)_3$, в четвертый — сернокислого натрия $Na_2SO_4$. Если после этого в каждый из стаканчиков прилить немного раствора гидроокиси аммония $NH_4OH$ (нашатырного спирта), то в первом стаканчике, там, где был голубоватый раствор сернокислой меди, выпадает зеленоватый осадок, который при дальнейшем добавлении раствора гидроокиси аммония полностью растворяется. Раствор приобретает красивый васильковый цвет. Во втором стаканчике, где первоначально был слабо-зеленоватый раствор хлорного железа, выпадает бурый осадок гидроокиси железа; в третьем, где раствор был бесцветен, образуется белый осадок гидроокиси алюминия, а в последнем — раствор по-прежнему останется прозрачным. Характерная окраска раствора или выпадение осадков определенного цвета — вот на чем основаны методы качественного анализа раствора.

Труд химика-аналитика можно сравнить с поисками иголки в стоге сена.

Правда, некоторые вещества образуют одинаково окрашенные осадки. Так, гидроокиси цинка, свинца, алюминия, магния белого цвета. Кроме того, если смешать несколько солей различных металлов и прилить туда раствор гидроокиси аммония, то наложение одних цветов осадков на другие сильно исказит всю картину и нельзя будет достаточно правильно судить о составе смешанного раствора.

В этих случаях химические элементы предварительно разделяют. Иногда таким методом может быть хроматография (см. ст. «Удивительная судьба одного простого открытия»). Иногда это могут быть просто обычные методы раздельного осаждения.

Существуют и другие методы разделения химических элементов, например э к с т р а к ц и я. Большинство неорганических веществ практически нерастворимо в органических растворителях, например в бензоле, хлороформе, эфире. Но известно, что многие органические вещества хорошо растворяются в подобных растворителях. Химики решили воспользоваться этой своеобразной ситуацией. Оказалось, что если соль какого-либо металла взаимодействует со сложным органическим соединением, то образовавшееся вещество, хотя оно и содержит атомы металла, обладает многими свойствами орга-




**Методом экстракции из сложной смеси выделяют лишь нужные элементы.**

нических веществ, в том числе и свойством растворяться в органическом растворителе. Так, например, если в растворе смесь солей алюминия, никеля и трехвалентного железа, да еще если в этой смеси железа очень мало, то, осаждая такой раствор гидроокисью аммония, трудно будет установить, есть ли железо в растворе. Однако если прилить к нашему раствору достаточное количество раствора роданистого аммония $NH_4CNS$, а затем добавить небольшое количество этилацетата и всю смесь тщательно перемешать, то первоначально бесцветный слой этилацетата (он не смешивается с водой) окрасится в темно-красный цвет. Это железо с роданидом образовало так называемое роданистое железо, которое растворимо в этилацетате значительно лучше, чем в воде, и окрашено в красный цвет. Практически все железо перейдет в этилацетат, оно экстрагировано этилацетатом. В результате этих реакций железо отделено от всех остальных элементов, присутствовавших в растворе, а по красной окраске роданистого соединения установлено, что в растворе было железо. Образование красного роданистого соединения — чрезвычайно чувствительная реакция на железо. Этим способом можно определить около $10^{-7}$ *г*, т. е. одну десятимиллионную долю грамма, железа в 1 $см^3$ раствора.

## СВЕТ И ЦВЕТ

Больше ста лет назад немецкий ученый Г. Кирхгоф обратил внимание на то, что соли различных металлов окрашивают бесцветное пламя газовой горелки в разные цвета: соли калия окрашивают пламя в бледно-фиолетовый цвет, соли натрия — в желтый, соли меди — в зеленый, кальция — в карминово-красный. Кирхгоф решил, что это поможет ему быстро и безошибочно устанавливать присутствие тех или иных химических элементов в изучаемых веществах. Однако радость ученого была преждевременной. Все шло хорошо до тех пор, пока он пользовался чистыми солями. Но если смешать соли натрия и калия, то на фоне ярко-желтого пламени горелки (присутствие натрия) разглядеть фиолетовую окраску калия практически невозможно.

На помощь пришел химик Бунзен. Он предложил рассматривать пламя горелки, в которое вносится смесь солей, через специальный прибор — спектроскоп. Если через призму спектроскопа пропускать белый свет, он разлагается в спектр. Но в отличие от других источников света пламя газовой горелки, в которое вносили испытуемую соль, давало не сплошной, а линейчатый спектр, причем положение линий на спектре было строго постоянным. Так, например, если рассматривать в спектроскоп пламя, в которое внесли соли натрия, то можно различить две очень близкие друг к другу и очень яркие желтые линии.

Если в пламя внести соли калия, то на спектре видны одна красная и две фиолетовые линии. Линии определенных химических элементов появляются на одних и тех же местах. Например, если внести в пламя хлористый, сернокислый, углекислый, азотнокислый натрий, то линии натрия будут появляться на одном и том же месте.

Кирхгоф и Бунзен испробовали все известные элементы и соединения «на пламя» и составили список химических элементов с характеристиками их линий в спектре. Можно

**Окраска пламени часто характеризует присутствие того или иного элемента. Зеленый цвет говорит о наличии меди, желтый — натрия и т. д.**

было безошибочно анализировать смеси веществ. Так родился спектральный анализ. Он оказался не только прекрасным методом качественного определения присутствия в смесях тех или иных химических элементов, но и занял почетное место среди количественных методов анализа.

## ПАСПОРТ ХИМИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ

Говорят, что художники и текстильщики, связанные с крашением тканей, различают около двух десятков оттенков красного цвета. Для химиков такое «интуитивное» различие цветов и оттенков не подходит. Ведь даже раствор одного и того же вещества в зависимости от его концентрации может иметь оттенки. Кроме того, химия знает множество разнообразных веществ и немало их окрашено в сходные цвета. Здесь на помощь химикам-аналитикам и пришла так называемая спектрофотометрия. С помощью спектрофотометра проводят анализ окраски химического соединения или его раствора.

Еще Исаак Ньютон, пропуская тонкий солнечный луч через стеклянную призму, обнаружил, что так называемый белый цвет является сложным. Каждый, наверное, видел радугу. Цвета, в которые окрашена радуга, и есть составляющие белый цвет. Такую же «радугу»— спектр — наблюдал и Ньютон, пропуская солнечный луч через призму. Характеризовать цвета словами «красный», «желтый», «зеленый» не совсем удобно. В самом деле, какой «зеленый» — светло-зеленый, темно-зеленый, салатовый? Это весьма неточная характеристика цветности. И только когда было доказано, что свет — это электромагнитные колебания, т. е. волны, и что каждая волна имеет свою длину, можно было точно характеризовать тот или иной цвет или оттенок. Например, красный цвет с длиной волны 620 *ммк* (миллимикрон — одна тысячная микрона, или одна миллионная доля миллиметра) или красный цвет с длиной волны 637 *ммк*. Достаточно назвать длину волны света, и ученым всего мира становится ясно, о каком цвете идет речь.

Спектрофотометр позволяет получить пучок света вполне определенной длины волны. В спектрофотометре две основные части — кювета и приемник света (фотоэлемент), который регистрирует силу светового потока. В кювету наливают изучаемый раствор и сквозь этот раствор пропускают свет определенной длины волны, который затем попадает на фотоэлемент. Длину волны света все время меняют от меньших длин волн к большим и следят за показанием стрелочного прибора, который соединен с фотоэлементом.

Если свет данной длины волны не поглощается, то стрелка стоит на месте, если же он в какой-то степени поглощается в растворе, то стрелка будет отклоняться от положения равновесия и можно точно определить, какое количество света данной длины волны поглотилось в нашем растворе.

Громадное количество органических и неорганических веществ было исследовано с помощью спектрофотометров. Были изучены даже спектры различных химических соединений в ультрафиолетовой и в инфракрасной областях длин волн. Оказалось, что каждому химическому соединению или иону присущ свой собственный, характерный только для него спектр, т. е. полосы поглощения. Каждое вещество имеет свой «цветовой паспорт». Именно на таком различии спектров и основан качественный спектрофотометрический анализ.

С помощью спектров поглощения можно проводить и количественный анализ. Было обнаружено, что во многих случаях интенсивность (глубина) окраски прямо пропорциональна концентрации (содержанию) химического соединения в растворе. Чем больше содержание данного соединения в растворе, тем сильнее раствор поглощает свет определенной длины волны. Таким образом, определяя поглощение света раствором, или, как говорят, его оптическую плотность, можно легко найти количество интересующего нас элемента.

Вообще чувствительность количественного спектрофотометрического анализа не очень велика — порядка 0,01—0,001%, но в отдельных случаях с его помощью можно определять десятитысячные и даже стотысячные доли процента примесей.

## ВЕСОВОЙ АНАЛИЗ

Само название «весовой анализ» говорит о том, что определение проводится взвешиванием. Конечно, вес вещества не может служить его качественной характеристикой, поэтому весовой анализ используется только для определения количества анализируемых веществ, т. е. как количественный метод.

Анализируемое вещество тем или иным методом сначала переводят в раствор. Затем из этого раствора последовательно выделяют содержащиеся в нем химические элементы или их соединения и взвешивают на аналитических весах с возможно большей точностью. Так, например, чтобы определить состав бронзы (сплав олова и меди), надо взвешенную навеску бронзы поместить в стеклянный стаканчик и прилить туда азотной кислоты. При взаимодействии с азотной кислотой медь переходит в раствор в виде азотнокислой меди, а олово окисляется до двуокиси олова $SnO_2$. Образовавшуюся двуокись олова отфильтровывают, прокаливают и взвешивают. Зная вес бронзы, а также вес образовавшейся двуокиси олова, можно легко подсчитать содержание олова и меди в нашем сплаве.

Весовой анализ применяют в практике редко, так как он весьма трудоемок и чувствительность его невелика — около 0,01%. Правда, в прошлом с помощью весового анализа были сделаны многие открытия.

В 1886 г. немецкий химик К. Винклер анализировал довольно редкий минерал аргиродит, который незадолго до этого был обнаружен в Саксонии. Методы весового анализа к тому времени были разработаны уже достаточно хорошо, и Винклер определил, что в новом минерале содержались в основном серебро и сера и небольшие примеси железа, цинка и ртути. Но когда он складывал процентное содержание всех найденных элементов, сумма упорно держалась на 93 и никак не хотела доходить до 100. Что же могли представлять собой неуловимые 7%? Винклер делает смелое предположение: 7% принадлежат неоткрытому элементу. Его предположение полностью подтвердилось. Слегка изменив схему анализа, он выделил эти неуловимые 7% и доказал, что они относятся к новому, неизвестному элементу, который и был назван в честь родины Винклера германием.

## РАДИОАКТИВНОСТЬ И ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Чувствительность весового анализа невелика — всего около 0,01%. Что это значит? Если в 1 *г* меди определили 0,01% примеси железа, это значит, что в данном образце меди содержится $10^{18}$ атомов железа. Такое громадное число даже и назвать трудно. Иначе говоря, в кусочке меди приблизительно на 10 000 ее атомов приходится один атом железа. А как при таких подсчетах выглядят другие методы анализа? Чувствительность определения железа спектрофотометрическим методом можно довести до $1 \cdot 10^{-6}$%. Если такое количество мы сможем определить в 1 *г* меди, то это будет означать, что в нем содержится лишь $10^{14}$ атомов железа и один его атом приходится на 100 000 000 атомов меди.

Есть ли еще более чувствительные методы анализа, которые определяли бы даже отдельные атомы? Оказывается, такие методы существуют и основаны они на явлении радиоактивного распада.

Изотопы всех элементов, расположенных в периодической системе за висмутом, подвержены радиоактивному распаду. Одна из наиболее важных характеристик этих изотопов — их период полураспада, т. е. время, за которое количество данного элемента уменьшается вдвое (см. ст. «Великий закон»). Зная эту характеристику, можно точно идентифицировать, т. е. опознать, любой радиоактивный изотоп и установить, какому элементу он принадлежит.

Вскоре после открытия явления радиоактивности выяснилось, что альфа-частицы, испускаемые некоторыми радиоактивными элементами, имеют постоянную величину так называемого свободного пробега в воздухе. Если мы имеем, например, торий, уран и радий, то альфа-частицы первого пролетают в воздухе самое маленькое расстояние, а альфа-частицы последнего — самое большое. Причем путь их можно наблюдать в специальном приборе — камере Вильсона. Таким образом, помещая изучаемое вещество в камеру Вильсона и наблюдая следы, оставленные альфа-частицами, можно не только качественно, но и количественно подсчитать распавшиеся единичные атомы.

Методы анализа, основанные на том или ином способе измерения радиоактивности, получили название радиометрических. И хотя их чувствительность необычайно высока, все же использовать многие из них для целей аналитического определения химических элементов часто очень трудно. Во-первых, работа с камерой Вильсона очень трудоемка. А во-вторых (и это главное), ведь не все элементы радиоактивны, и тем более альфа-излучатели. Если же элемент и радиоактивен, но является бета- или гамма-излучателем, его идентифицирование в камере Вильсона крайне затруднено.

Но все же химики-аналитики нашли способ «приручить» радиоактивность для своих нужд. Они разработали метод *активационного анализа*. Почти все химические эле-

менты имеют природные изотопы. Причем большинство из них не являются радиоактивными — это стабильные изотопы. Если в ядро какого-либо стабильного изотопа ввести всего лишь один нейтрон, большинство образовавшихся новых ядер становится радиоактивными, т. е. они будут самопроизвольно распадаться с испусканием альфа-, бета- или гамма-лучей. Именно на регистрации такого ядерного излучения и основан активационный анализ. Методика проведения активационного анализа относительно проста: подготовленный образец помещают на определенное время в ядерный реактор, а затем измеряют его активность. Определяя затем характер излучения и его интенсивность, можно установить природу и количество содержащейся в исследуемом образце примеси. Чувствительность актизационного анализа необычайно высока. Он позволяет обнаружить поистине непредставимо малые количества вещества. Так, например, с его помощью можно обнаружить около $1 \cdot 10^{-10}$% мышьяка или, например, около $1 \cdot 10^{-13}$% элемента индия. В чистой платине, облученной в ядерном котле, удается обнаружить $1 \cdot 10^{-9}$% иридия. Чтобы более ясно представить себе эти цифры, отметим, что количество индия $1 \cdot 10^{-13}$% соответствует одному атому примеси индия на миллион миллиардов (1 000 000 000 000 000) атомов основного вещества, в котором этот индий находится.

## МОЖНО ЛИ АНАЛИЗИРОВАТЬ ИЗОТОПЫ

Обратили ли вы внимание на то, что почти все методы, о которых было рассказано, позволяют определять лишь химическую природу вещества или определенного элемента? Можно легко установить, что данное вещество является сернокислым никелем или азотнокислой медью или что в состав изучаемого сплава входит молибден или вольфрам, цирконий или ванадий. Но на практике часто необходимо установить, не только какой химический элемент присутствует в образце и сколько его, но также и каков изотопный состав данного элемента. Известно, что изотопы различных элементов имеют практически одинаковые химические свойства и лишь незначительно отличаются друг от друга физическими свойствами. Этим обстоятельством и воспользовались ученые.

Метод, который используют при анализе изотопов, получил название м а с с-с п е к т р о м е т р и ч е с к о г о. В анализаторе, или источнике ионов, исследуемое вещество нагревают, превращая его в газообразное состояние. При этом в большинстве случаев молекулы его распадаются на отдельные ионы. Образовавшиеся ионы под действием электромагнитного поля выводятся в специальную изогнутую трубку. В ней создается очень высокое разряжение (чтобы летящие в трубке ионы не сталкивались с молекулами кислорода, азота и других газов, входящих в состав воздуха). Сама трубка расположена между двумя полюсами сильного постоянного магнита. Но магнитное поле, хотя оно и постоянно, будет по-разному действовать на ионы летящих изотопов. Ион того изотопа, в ядре которого меньше нейтронов (более легкий), будет сильнее отклоняться от своего пути, а ион, который тяжелее,— меньше. Пролетев через всю трубу (обычно около двух метров), ионы различных изотопов попадут в различные места приемника, где их и регистрируют.

Масс-спектрометрический метод, хотя и очень сложен, обладает весьма большой чувствительностью. С его помощью можно анализировать отдельные изотопы, количество которых подчас составляет всего $10^{-13}$ — $10^{-14}$ *г*.

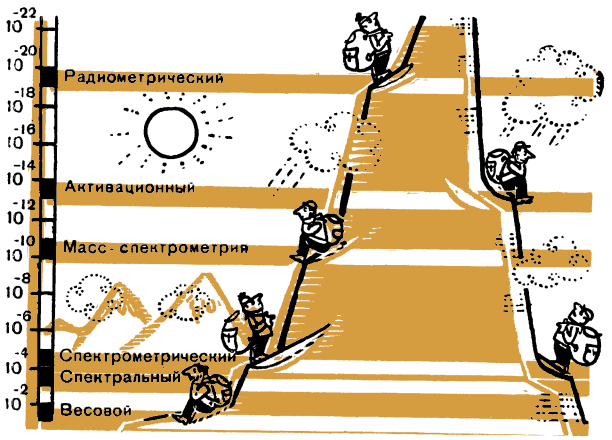
Этот метод был разработан в применении лишь к анализу веществ. Ведь он очень трудоемок, и получить с его помощью весомые количества какого-либо изотопа крайне затруднительно. Чтобы получить лишь 1 грамм-атом изотопа, необходимо собрать $6 \cdot 10^{23}$ его атомов.

Однако в самом начале 40-х годов нашего века, для того чтобы запустить первый урановый котел (осуществить контролируемую цепную ядерную реакцию), ученым необходимо было получить в чистом виде изотоп урана-235. Здесь-то и был использован принцип масс-спектрометрии.

## ЕСТЬ ЛИ ПРЕДЕЛ АНАЛИЗУ

Если в 40-х годах наука и техника требовали от количественного анализа определять тысячные доли процента примеси, то в настоящее время стало необходимо определять уже одну триллионную долю процента примеси в исходном материале.

Уже разработаны методы, с помощью которых определяют самые ничтожные примеси отдельных элементов. Так, например, для производства полупроводниковых приборов примеси в германии не должны превышать $1 \cdot 10^{-8}$%. Для кремния эта величина должна быть умень-




**Шкала чувствительности различных аналитических методов.**

шена еще примерно в тысячу раз и составит приблизительно $1 \cdot 10^{-11}$ %. Пожалуй, наиболее чувствительными ныне являются активационный метод и метод газовой хроматографии (см. ст. «Удивительная судьба одного простого открытия»). С их помощью определяют примеси порядка $10^{-12}$ — $10^{-13}$ %, т. е. порядка $10^{-14}$ — $10^{-15}$ *г* примеси на 1 *г* основного вещества. По чувствительности к ним приближается масс-спектрометрический метод анализа, чувствительность которого в отдельных случаях $10^{-13}$ и $10^{-12}$ *г*.

В настоящее время требования к чистоте материалов стремятся к такому пределу, когда будет необходимо определять единичные атомы примеси, т. е. количества вещества порядка $10^{-22}$ *г*. И эту нелегкую задачу будут решать уже не химики, а физики.

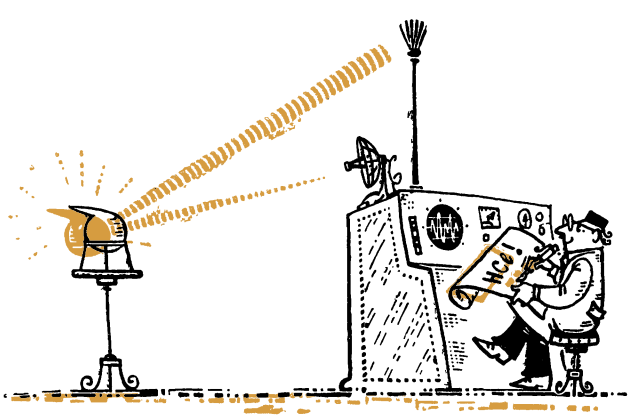
А теперь несколько слов о возможностях методов анализа. На верхнем рисунке изображена шкала чувствительности различных аналитических методов. Приведена так называемая средняя чувствительность. По отдельным элементам эта чувствительность может быть значительно выше. Так, например, спектрофотометрический метод при рядовых определениях большинства элементов имеет чувствительность порядка 0,01—0,001 %, но эта чувствительность в ряде случаев может быть значительно выше.

В настоящее время обычные, стабильные атомы химических элементов можно анализировать в количествах порядка $10^{-14}$—$10^{-15}$ *г*, а радиоактивные — порядка $10^{-22}$ *г*. Аналитическая химия еще ждет тех, кто сумеет заполнить это «белое пятно» — разработать методы анализа, которые позволят определять примеси стабильных элементов порядка $10^{-15}$—$10^{-16}$ *г* и ниже.

По-видимому, в недалеком будущем чувствительность активационного анализа сможет возрасти раз в сто, но это, вероятно, будет уже его пределом. Улучшение конструкций различных типов масс-спектрометров также, очевидно, сможет поднять чувствительность этого метода раз в сто и более.

Однако есть еще один метод — так называемый радиоспектроскопический анализ, возможности которого в определении микропримесей не только далеко не исчерпаны, но и практически даже не установлены. Принцип этого метода до некоторой степени сходен с радиометрическим анализом, но с его помощью можно определять стабильные атомы и соединения. Проведенные эксперименты показали, что с его помощью можно легко «уловить» присутствие соединений в количестве $10^{-8}$ —$10^{-10}$ *г*. Основан этот метод на следующем. Известно, что атомы в молекуле любого химического соединения не находятся в каких-то определенных положениях, а колеблются около определенных центров равновесия. Так, например, в молекуле хлористого водорода атомные ядра хлора и водорода то сближаются, то отдаляются друг от друга. Ядра заряжены и испускают слабые электромагнитные колебания в области радиочастот. И вот оказалось, что если на молекулы хлористого водорода воздействовать радиоволнами той же длины волны, какую они испускают, то происходит их сильное, «резонансное» поглощение.

Вот это-то поглощение и можно зарегистрировать.




**Метод «улавливания радиоволн» — радиоспектроскопия — один из самых перспективных в наше время. С помощью этого метода определяют не только отдельные элементы, но и сложные соединения.**

В этом методе чувствительность определения химических соединений в первую очередь зависит от чувствительности радиоспектрометра. Бурное развитие радиоэлектроники поможет в будущем повысить чувствительность радиоспектрометров в миллион и даже миллиард раз. И метод радиоспектроскопического анализа сможет занять достойное место наряду с другими методами в определении микропримесей. ■

# УДИВИТЕЛЬНАЯ СУДЬБА ОДНОГО ПРОСТОГО ОТКРЫТИЯ

## (хроматография)

В 1903 г. русский ученый профессор Михаил Семенович Цвет сделал очень скромное и простое открытие, которое осталось в то время почти незамеченным и надолго было забыто. Но судьба этого открытия поистине удивительна.

Хроматография (так назвал свое открытие профессор Цвет) стала в наши дни незаменимой помощницей науки.

Без нее были бы немыслимы достижения биохимии, сумевшей разобраться в невообразимой сложности строения и состава белковых соединений. Без хроматографии нельзя было бы успешно синтезировать самые последние трансурановые элементы периодической системы. Ядерная химия не могла бы теперь успешно развиваться без хроматографии.

Методами хроматографии разделяют и чистят лекарственные вещества, антибиотики, витамины, алкалоиды, гормоны. Хроматография незаменима при поисках нефтяных месторождений. Без нее не может обойтись химик-органик, изучающий строение и состав сложнейших органических соединений. Другими методами было бы совершенно немыслимо определить, например, состав и природу изомеров. При помощи хроматографии удается детально изучить некоторые химические свойства многих редкоземельных элементов.

В будущем химики научатся с помощью хроматографического способа извлекать золото из воды океанов, хотя оно содержится там в ничтожных концентрациях, но общее количество его огромно. И этот хороший металл сменит свою репутацию символа обогащения и станет тружеником на химических заводах. Химикам он очень нужен.

Не следует думать, что хроматографические процессы используются только учеными в их лабораториях или инженерами на заводах. Хроматографические явления лежат в основе многих гигантских геохимических процессов на земной поверхности, например в образовании почвы и многих рудных месторождений.

### ЧТО ЖЕ ОТКРЫЛ ПРОФЕССОР ЦВЕТ?

Открытие М. С. Цвета было удивительно простым. Настолько простым, что его мог бы сделать любой школьник, обладающий пытливым умом, большой любознательностью и умением не только смотреть вокруг себя, но и видеть, подмечать удивительное и необычное в простом.

М. С. Цвет интересовался природой хлорофилла, от которого зависит окраска листьев. Роль этого вещества в природе огромна: с его помощью в зеленом живом листе происходит превращение световой энергии солнца в химическую энергию органических соединений.

Профессор Цвет насыпал в стеклянную трубку тонко измельченный порошок чистого мела, смочил его бензолом, налил сверху немножко раствора хлорофилла, извлеченного из зеленого листа (самый верхний слой порошка, конечно, сразу окрасился в зеленый цвет), и стал медленно, по каплям промывать бензолом трубочку с мелом. По мере того как верхний зеленый слой промывался бензолом, окраска вслед за растворителем начала передвигаться в виде зеленого колечка вниз по трубке. Потом (в этом-то и заключалось замечательное открытие Цвета) зеленое колечко стало постепенно разделяться на несколько отдельных колец: ученый обнаружил узкую желтую полоску, она двигалась по трубке наиболее медленно, ее опередила желто-зеленая полоса, впереди которой шла широкая зелено-синяя полоска, перед

ней две желтые и в самом низу двигалась еще одна полоса, тоже желтого цвета. Тщательный анализ показал, что над самой верхней желтой полоской располагалась еще одна—бесцветная.

Этот простой опыт положил начало разгадке великой тайны зеленого листа: было доказано, что хлорофилл в листе растения сложен, что он состоит из нескольких близких между собой, но различных химических соединений. Значение этого простого опыта особенно велико потому, что он лег в основу новой науки.

Вот как образно рассказал о своем открытии сам автор: «Подобно световым лучам в спектре, различные компоненты сложного пигмента закономерно располагаются друг за другом в столбе сорбента и становятся доступными качественному и количественному исследованию. Такой расцвеченный препарат я назвал хроматограммой, а соответствующий метод анализа — хроматографическим методом».

## ЧТО ПРОИСХОДИТ В ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЙ КОЛОННЕ?

Что же произошло в стеклянной трубочке, набитой порошком мела? Какие удивительные силы так легко и просто разделили сложную природную смесь многих химических видоизменений сложного вещества, настолько близких между собой, что отделить их друг от друга не удавалось самым искусным химикам?

Механизм хроматографического разделения теперь хорошо изучен. Он прост, хотя теория действия колонн очень сложна и ученые еще не умеют их точно рассчитывать. (Трубки с сорбентом для хроматографического разделения независимо от их конструкции теперь называются к о л о н н а м и.)

Лучше всего рассмотреть действие хроматографической колонны на простейшем примере знакомой нам трубки с мелом.

Зеленый раствор вытяжки из листьев обесцвечивается, как только приходит в соприкосновение с порошком мела, а мел становится зеленым. Молекулы всех соединений, входящих в состав хлорофилла, извлеченного из зеленого листа, осаждаются на поверхности частиц мела. Поглощение растворенного вещества, паров или газов поверхностью твердых тел или жидкостью химики называют с о р б ц и е й. На этом явлении и основаны все хроматографические методы разделения смесей, сверхтонкой очистки вещества и анализа.

Захваченные поверхностью твердого тела молекулы не остаются на ней неподвижными. Они могут переходить обратно в раствор, снова осаждаться, вновь растворяться...

Бесчисленное множество раз меняет свое состояние каждая молекула, переходя с поверхности в раствор и обратно. Между раствором (бензол в опытах Цвета) и сорбентом (порошок мела) устанавливается равновесие: на поверхности частиц мела находятся **почти** все молекулы. В растворе их очень мало — **почти** нет совсем. Но в этом-то «почти» и заключается сущность хроматографического эффекта.

Немногие молекулы, находящиеся в растворе, увлекаются вниз по трубке вместе с потоком растворителя. Но по пути они немедленно осаждаются вновь на другие частицы мела, а вместо них переходят в раствор новые молекулы. Это повторяется огромное число раз. Медленный поток растворителя беспрерывно поступает сверху в трубку. В верхней части окрашенного слоя становится все меньше и меньше сорбированного вещества, в нижней части этого слоя — все больше и больше. И так постепенно цветная прослойка продвигается в виде колечка через сорбент вниз по трубке.

Но различные молекулы с разным составом или строением сорбируются на твердой поверхности по-разному. Одни из них немного прочнее, другие несколько слабее. Одни дольше находятся в связанном состоянии и меньше в растворе. Другие чуть дольше первых задерживаются в растворе и, конечно, быстрее увлекаются потоком растворителя.

Поэтому окрашенная смесь различных веществ постепенно разделяется на свои составные части. Каждая такая часть сосредоточивается в своем слое. И эти слои отличаются друг от друга цветом. Двигаясь с разной скоростью вдоль трубки, эти слои расходятся все дальше

### Удивительное совпадение

**Название «хроматография» было дано новой науке ее основоположником М. С. Цветом. Оно как бы было подсказано ему цветными колечками — слоями мела в стеклянной трубочке, окрашенными в разные цвета хлорофиллом зеленого листа, который как будто бы сам записал таким способом, из чего он состоит (по-гречески «хроматос» — цвет, «графо» — писать). Занятно и удивительно совпадение имени автора и созданной им науки.**

друг от друга. Так и образуется хроматограмма. Каждое отдельное цветное кольцо соответствует одному химическому соединению.

Вытолкнув столбик сорбента из трубки, можно вырезать из него различно окрашенные слои и, отмыв содержащиеся в них вещества, получить каждое отдельно в чистом виде. Можно поступить еще проще: продолжая промывку бензолом, собирать раствор от каждого цветного слоя отдельно, по мере того как они, пройдя колонну насквозь, начнут выходить из нее с потоком растворителя.

Движение молекул в хроматографической колонне напоминает как бы состязание спортивных команд в беге на очень длинные дистанции. Микробегуны в разных спортивных костюмах, например в опыте с хлорофиллом — в желтых, зеленых и синих, бегут с одинаковой скоростью (скорость потока растворителя). Но свое право отдыхать по дороге каждая команда использует по-разному. Все они сидят на поверхности очень подолгу (находятся в сорбированном состоянии). Все они бегут очень короткое время (увлекаются потоком бензола). Но одна команда отдыхает все же чуть меньше другой, а вторая — чуть меньше третьей. Конечно, те бегуны, которые отдыхают меньше, и опередят своих соперников.

Таким образом, ничтожные различия в скорости поглощения (сорбции) и обратного выделения вещества в раствор (десорбции) становятся причиной разделения смесей хроматографическим способом. А эти ничтожные различия в сорбционной способности молекул в свою очередь зависят от их химической природы.

## А ЕСЛИ ВЕЩЕСТВО БЕСЦВЕТНО?

Хроматография — этот удивительный по простоте способ тончайшего аналитического разделения сложных смесей — и в наши дни нередко применяется химиками почти в том же виде, в каком ее создал автор. Много тысяч различных твердых веществ изучили химики, выбирая наиболее подходящие сорбенты. Еще больше было исследовано растворителей. Были испытаны сахар, мел, крахмал, уголь, кремнезем, спирты, эфиры, углеводороды и т. п. Очень часто решить самые неразрешимые, трудные проблемы помогало применение простых и обычных материалов.

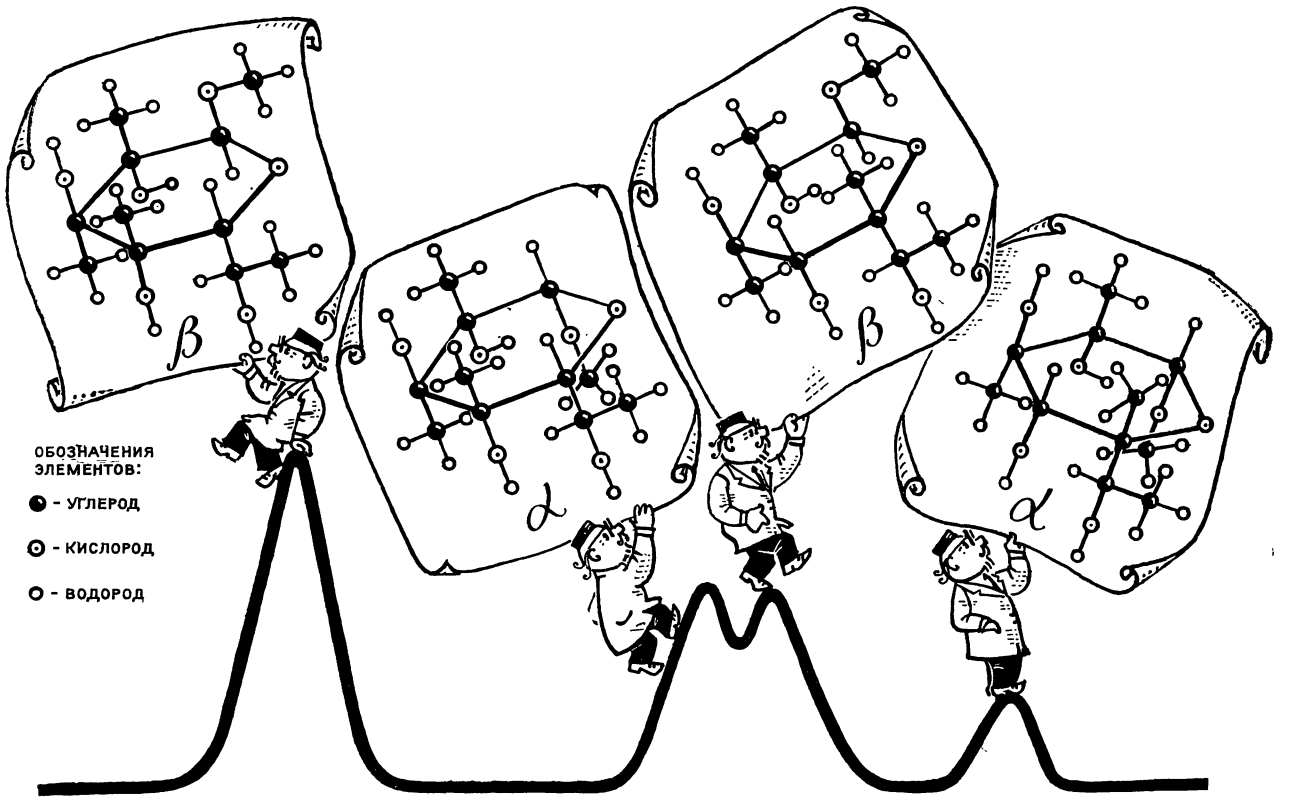
Не следует думать, что хроматография помогает изучать только окрашенные вещества. Разработаны многочисленные способы, как обнаруживать на хроматограмме бесцветные зоны. Для этого, например, применяют ультрафиолетовые лучи, под действием которых очень многие вещества флюоресцируют и невидимые зоны на хроматограмме начинают светиться. Можно бесцветные зоны «проявить», обработав сорбент реактивом, который образует с изучаемым веществом окрашенное соединение. Почти любое физическое свойство вещества может быть использовано, чтобы обнаружить его в растворе на выходе из хроматографической колонны.

## ЧЕМ ПАХНЕТ ЗЕМЛЯНИКА

Химики создают теперь новые, еще более мощные методы хроматографического анализа. Среди них может быть названа непревзойденная газо-жидкостная хроматография с ее поразительной чувствительностью. Сорбент в ней нелетучая жидкость, которой смочен, например, порошок силикагеля (т. е. пористая прокаленная двуокись кремния $SiO_2$), а движущая среда — любой инертный газ. С помощью этого способа хроматографии изучают сложные смеси химических соединений в парообразном состоянии.

Самая удивительная хроматографическая разделительная колонна построена, пожалуй, наиболее просто. Она представляет собой очень тоненькую металлическую или пластмассовую трубочку с диаметром канала всего 0,2—0,4 *мм*. Стенки этой трубочки смочены разделяющей нелетучей жидкостью. Вот и все устройство. Чтобы можно было достичь высоких степеней разделения, трубочку иногда приходится делать очень длинной.

На такой колонне, например, был проведен анализ... аромата свежей земляники. Потребовалась колонна длиной в 120 *м*. Свернутая в спираль трубка была помещена в термостат, в котором температура медленно и равномерно повышалась. Это было необходимо для того, чтобы изучить и те труднолетучие компоненты приятного земляничного запаха, которые могут выделяться ягодой только в солнечный жаркий день. Через колонну пропускался инертный газ аргон. Он был выбран не случайно. Ничтожнейшие примеси в нем можно обнаружить по... его электропроводности. Для этого аргон облучают радиоактивными препаратами, и, если в нем есть примеси органических веществ, он ионизируется и становится способным проводить ток. Резкое изменение электропроводности газа вызывает в специальном приборе электри-




**С помощью газовой хроматографии легко провести разделение α и β изомеров метиловых эфиров глюкозидов, имеющих совершенно одинаковый состав и отличающихся лишь пространственным расположением метильных групп в одном из звеньев этих сложных молскул.**

ческий сигнал, который после усиления подается на записывающее устройство. Чувствительность такого прибора (детектора) необычайно велика. Можно уверенно определить... одну тысячемиллиардную долю грамма вещества ($10^{-12}$ *г*). А всего для полного анализа сложнейшей смеси достаточно нескольких миллиграммов.

Запах свежей земляники оказался очень сложным. Чтобы создать аромат ее спелых ягод, прелесть которого невозможно описать словами, в таинственной лаборатории растения синтезируется не менее **девяноста шести** сложнейших органических душистых соединений.

## КОЛОННА ДЛИНОЙ... В ПОЛКИЛОМЕТРА

Газовая хроматография настолько чувствительна, что ее можно сравнить со спектральным и масс-спектрометрическим методами анализа. С ее помощью решают трудные и сложные задачи, недоступные другим способам анализа. Можно исследовать смеси, состоящие из десятков и сотен компонентов.

Насколько сложны проблемы современной техники, успешно решенные хроматографией, можно представить себе на примере анализа природной нефти. Чтобы изучить состав нефти, потребовалось сконструировать капиллярную колонну длиной около **пятисот** (500!) метров. Удалось не только установить число различных компонентов в сырой нефти (их оказалось свыше **двухсот тридцати**), но и расшифровать, что представляет собой каждый из них.

## ХРОМАТОГРАФИЯ НА ЛИСТЕ БУМАГИ

Трудно даже представить, что самый обыкновенный лист бумаги может служить своеобразной лабораторией химического анализа. На

нем можно определить состав природных химических соединений, разделить которые бессильны многие другие методы аналитической химии.

Простейшую хроматограмму на бумаге нетрудно получить самому. Возьмите лист промокательной или лучше фильтровальной бумаги. Смешайте по капле синие и красные чернила. Годится и смесь любых растворимых в воде красок, лишь бы они не реагировали химически друг с другом (иначе они могут выпасть из раствора, образовав нерастворимый осадок).

Нанесите маленькую капельку смеси в центр бумажного листа. Затем точно в середину цветного пятнышка вводите по каплям воду. Впитается одна—капните другую. И вскоре по листу бумаги начнет расползаться настоящая красочная хроматограмма: синее пятно внутри и красное кольцо вокруг. Несколько разных капель и немного терпения — и можно получить изумительно красивые узоры.

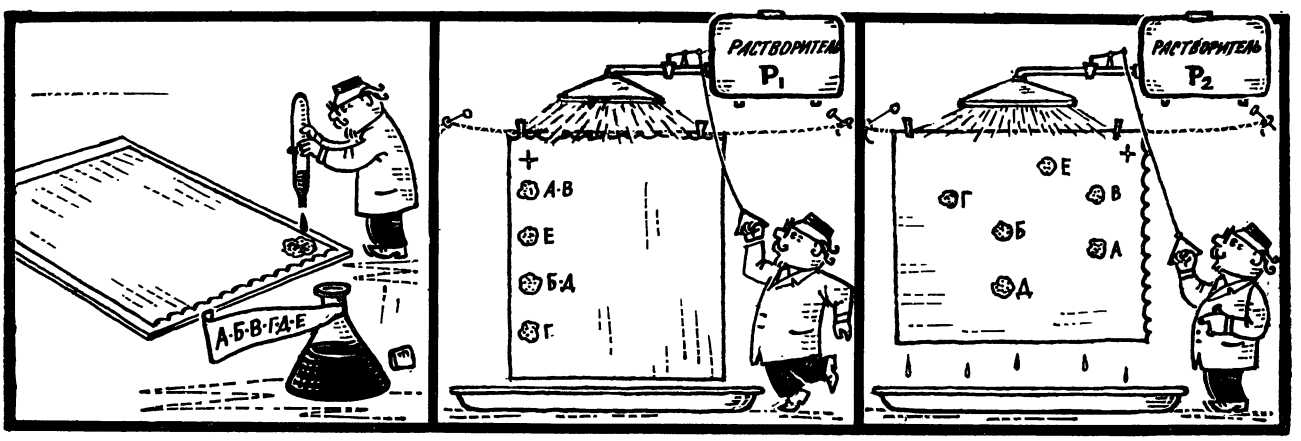
Хроматограммы на бумаге чаще всего получают на бумажных полосках. Такую полоску подвешивают вертикально и верхний ее конец погружают в сосудик с растворителем. Впитываясь в бумагу и опускаясь по ней вниз, растворитель с разной скоростью смывает из нанесенного на полоску пятна смеси отдельные составные части. На бумажной полоске образуется хроматограмма — отдельные пятна. Их число соответствует числу компонентов анализируемой смеси.

Пятна на хроматограмме иногда невидимы. Тогда полоску сушат и обрабатывают раствором реактива, дающего цветное окрашивание с составными частями смеси. По положению цветных пятен, по их окраске и форме можно определить, что входит в состав изучаемой сложной смеси. Трудноразделяемые смеси обрабатывают дважды разными растворителями в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В результате получают двухмерную хроматограмму.

## ХРОМАТОГРАФИЯ И БИОХИМИЯ

Современная биохимия сумела выяснить немало загадочных процессов, протекающих в живом организме, но мало кому известно, что в этом биохимия многим обязана хроматографии. Наука нашего времени расшифровала состав и строение белка в живом организме. Это, конечно, одно из величайших достижений. Труднейший и важнейший раздел биологической химии — химия природных белковых соединений вообще, вероятно, не могла бы успешно развиваться без помощи хроматографии на бумаге.

Бумажные хроматограммы не только дали ученым средство изучить, из каких составных частей, из каких аминокислот состоит белок различных живых организмов, но (с неполным гидролизом — осторожным расщеплением белковых молекул) позволили даже определить чередование различных аминокислот в молекуле белка. Хроматография позволяет быстро определять аминокислотный состав белка, и этот




**Нередко встречаются сложные смеси, которые невозможно разделить при помощи одного растворителя. Тогда полоску с нанесенной на нее пробой смеси последовательно обрабатывают двумя различными растворителями $P_1$ и $P_2$ в двух перпендикулярных направлениях. На такой двухмерной хроматограмме приходится расставаться самым близким по свойствам веществам.**

метод уже практически применяется в сельском хозяйстве. Он дает возможность получать высокоэффективные кормовые рационы для сельскохозяйственных животных.

Все, чего достигла биохимия с помощью хроматографии, невозможно даже перечислить. Хроматографическими методами изучаются витамины, гормоны, антибиотики, алкалоиды. С их помощью производится очистка этих веществ, их анализ, контроль производства. Так хроматография помогает побеждать самые тяжелые болезни человека.

Весьма вероятно, что хроматография поможет разрешить великую загадку фотосинтеза в зеленом листе. Если человек овладеет этим процессом, одним из самых грандиозных в природе, наиболее сложных и неясных, он овладеет неиссякаемым источником энергии. Открытие тайны фотосинтеза было бы значительно более важным, чем овладение атомной энергией. Хроматография уже помогает исследовать сложнейшую цепь химических реакций в освещенном солнцем зеленом листе.

Быть может, недалеко то время, когда человек научится улавливать солнечную энергию с такой же эффективностью, как это делает живой зеленый лист. Можно не сомневаться, что немалая заслуга в этом будет принадлежать хроматографии.

## ТОНКОСЛОЙНАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ

Очень похожа на бумажную хроматографию хроматография в тонком слое. На стеклянную или пластмассовую пластинку наносится тонкий равномерный слой тонко измельченного сорбента. Сам процесс хроматографического разделения идет так же, как и на бумаге. Тонкослойная хроматография обладает существенными преимуществами: разделение протекает значительно быстрее, а главное, легче выбрать наиболее подходящие сорбенты.

## ИОНООБМЕННАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ

В наши дни ученые разрабатывают все новые и новые более чувствительные хроматографические методы и создают теорию хроматографического процесса и способы расчета разделительных колонн. Но то, что было достигнуто с помощью ионообменной хроматографии, недавно казалось бы сказкой, неосуществимой фантазией.

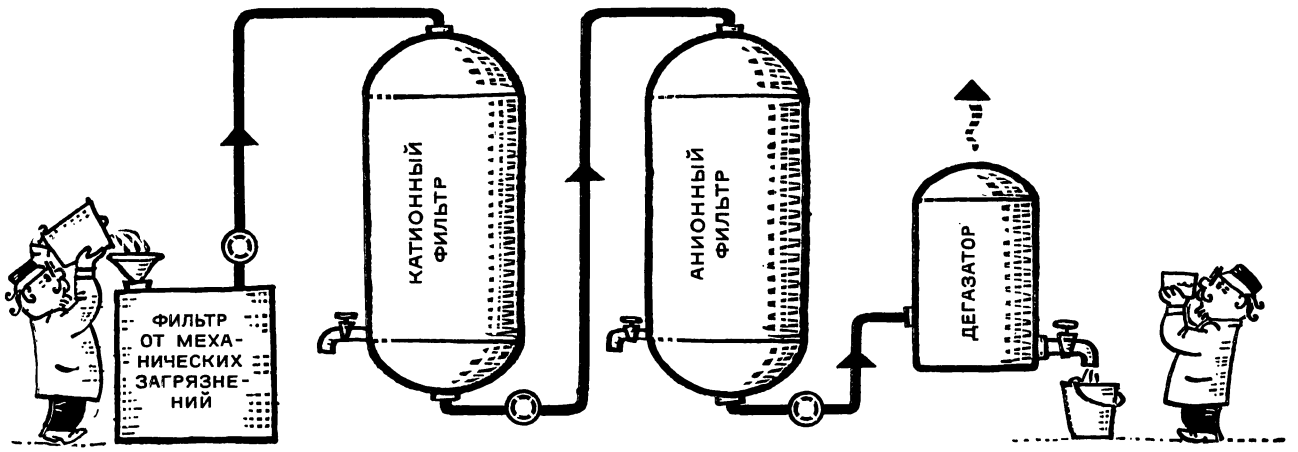
Метод ионообменной хроматографии ничем не отличается от способа профессора Цвета, только вместо нейтрального сорбента — мела, крахмала, угля и т. п.— в ионообменной хроматографии применяются специально для этого созданные химиками новые полимерные вещества — ионообменные смолы. Теперь известно уже очень много таких сорбентов с ионообменными свойствами. Все они обладают замечательной способностью: каждая крупинка такого сорбента — как бы гигантская молекула кислоты (смолы — катиониты) или основания (аниониты)— вступает в реакцию химического обмена.

Ионообменные смолы нерастворимы. Если хроматографическую колонну наполнить тонким порошком такой смолы, из раствора будут поглощаться ионы тяжелых металлов и взамен в растворе появится кислота или щелочь. В таких колоннах теперь, например, очищают воду для питания котлов на больших тепловых электростанциях. Сначала вода проходит через фильтры и очищается от ила, взвешенных в ней глинистых и песчаных частичек, потом поступает в колонну, наполненную катионитовой смолой. В этой колонне из воды полностью поглощаются соли кальция и магния, делающие воду «жесткой», вместо них появляются ионы водорода — образуется кислота. Вода, подкисленная в результате химического обмена, проходит анионитовую колонну, где обмениваются анионы образовавшихся кислот на гидроксильные ионы, которые тут же сразу нейтрализуются водородными ионами, и получается чистая вода. Достаточно пропустить засоленную воду последовательно через две такие колонны, чтобы получить воду чище дистиллированной. Отработанные смолы легко регенерируются снова.

Ионообменные колонны очищают сотни тысяч тонн воды на тепловых электростанциях, на фабриках, на заводах — всюду, где нужна чистая вода. Они превращают морскую, засоленную воду в пресную, пригодную для питья, они снабжают питьевой водой и жителей солончаковых пустынь, и экипажи кораблей.

Ионообменная хроматография помогает извлекать ценные металлы из сбросных промышленных стоков.

Химики мечтают создать ионообменные смолы с высокой избирательной способностью. Они уверены, что уже скоро гигантские ионообменные хроматографические колонны, установленные на берегах морей, начнут извлекать из Мирового океана безграничные запасы ценных для техники металлов: урана, золота и др.




**Воды на Земле очень много, но далеко не всю ее можно использовать из-за высокого содержания солей. Ионообменная хроматография превращает морскую и соленую воду пустынь в пресную.**

## ХРОМАТОГРАФИЯ И ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН

До сих пор еще химики не закончили спор о том, как должен быть построен последний, седьмой период менделеевской таблицы. Этот вопрос для науки особенно важен и принципиален.

Теория на него ответа дать не может: слишком сложны электронные оболочки тяжелых атомов и рассчитать теоретические орбиты всех их электронов пока невозможно. Остается детально изучать химические свойства каждого элемента — тот путь, которым шел сам Менделеев. Зная химические свойства нового элемента, можно найти ему место в периодической таблице.

Но чтобы химик мог изучить свойства известного элемента, он должен его иметь. В последнем же периоде таблицы после урана находятся элементы, которых еще не так давно совсем не было в распоряжении человека. В природе подавляющее большинство из них найти невозможно. Все эти элементы созданы человеком искусственно. Физики обнаруживали рождение новых атомов по их радиоактивным характеристикам. Наука попала в заколдованный круг: как разместить эти новые элементы в последнем периоде таблицы Менделеева? Чтобы получить новый элемент, надо его определить и выделить в чистом виде, а для этого необходимо знать его свойства. Для того же, чтобы их изучить, надо новый элемент иметь в руках.

Ионообменная хроматография помогла науке найти выход из этого трудного положения. Действительно, совсем еще недавно нельзя было и мечтать о том, чтобы изучать химические свойства элемента, имея в руках всего **несколько атомов**. Хроматография предоставила науке эту поистине чудесную возможность.

Загадка седьмого периода в периодической таблице могла быть разрешена только путем сравнения трансурановых элементов с элементами предшествующих периодов — шестого и пятого. Но количественный рост числа ядерных зарядов вносит резкие качественные изменения в строение электронных оболочек атома. Шестой период менделеевской таблицы, в котором в одной из клеток помещаются сразу пятнадцать элементов-близнецов (лантан и 14 лантаноидов), отличен от пятого периода, где такого семейства нет.

Как же должен быть построен седьмой период? Если он похож на пятый, то все трансураны должны быть резко различными по своим химическим свойствам. Если же седьмой период сходен с шестым, трансурановые элементы должны быть близнецами и так же, как и редкоземельные элементы, занимать все вместе одну клетку в той же самой третьей вертикальной группе.

Согласно периодической системе, можно ожидать, что более вероятен второй вариант. Но наука не терпит догадки без доказательств. Теория дать его в этом случае бессильна, а точное доказательство необходимо. Его мог дать только опыт.

Чтобы иметь основание поместить трансурановые элементы в одну общую клетку периодической системы, химики должны были

доказать, во-первых, что все они сходны между собой и, во-вторых (и это главное), что по химическим свойствам все они похожи на редкоземельные элементы (см. ст. «Великий закон»).

Решение этой трудной, важнейшей для химии задачи было найдено благодаря хроматографии. Вот как это удалось сделать. Смесь редкоземельных элементов от европия (№ 63) до лютеция (№ 71) была облучена нейтронами. Полученные радиоактивные изотопы разделили на ионообменной хроматографической колонне. Радиоактивность каждой капли раствора, вытекающего из колонны, измерялась отдельно. Оказалось, что, чем выше порядковый номер элемента, тем быстрее он выходит из колонны при хроматографическом разделении. И чередование элементов в порядке выхода их из ионообменной колонны удивительным образом точно соответствует их взаимному положению в периодической системе элементов.

Когда таким образом было изучено хроматографическое поведение редких земель, исследовали поведение трансурановых элементов. В тех же условиях (на той же колонне, наполненной той же ионообменной смолой, с применением того же состава растворителей) были подвергнуты хроматографическому разделению известные к этому времени четыре трансурановых элемента: америций (№ 95), кюрий (№ 96), берклий (№ 97) и калифорний (№ 98). Так как все трансурановые элементы радиоактивны, то точно так же измерялась активность каждой капли раствора. В этих исследованиях удалось раскрыть химическую природу элементов, созданных искусственно пока еще в незримых, невесомых количествах. В руках исследователей калифорния было меньше тысячемиллиардной доли грамма; это в миллиарды раз меньше, чем было бы необходимо химикам, чтобы изучить его обычными методами химического анализа.

Результат был прост и поразителен. Хроматография позволила уловить тончайшие оттенки в химическом различии новых элементов: оказалось, что они действительно очень сходны между собой; оказалось, что они, так же как и редкие земли, выходят из хроматографической колонны в порядке, строго соответствующем их положению в периодической системе,— раньше появляется тот элемент, у которого порядковый номер больше. И мало того, оказалось возможным уловить тончайшие различия в сходном строении электронных оболочек атомов, изучая взаимное расположение кривых активности на хроматограммах.

Так было доказано, что все актиноиды, и в их числе трансураны, образуют в седьмом периоде единую группу элементов с весьма сходными химическими свойствами. Эти элементы должны быть помещены в одной общей клетке таблицы Менделеева, так же как и лантаноиды,— в шестом периоде.

По аналогии эта группа элементов получила название по своему первому представителю— актиноиды. В нее входят пятнадцать элементов: от актиния (№ 89) до недавно открытого трансурана лоуренсия (№ 103). Последний из открытых трансуранов—элемент №104 должен быть аналогом гафния.

## ХИМИЯ ОДНОГО-ЕДИНСТВЕННОГО АТОМА

Не следует думать, что слова «наука» и «чудо» противоречат друг другу. Нельзя считать, что задача науки—разоблачать чудеса. Будет гораздо правильнее утверждать, что наука-то и создает подлинные чудеса, делает сказочно немыслимое реальным и действительным.

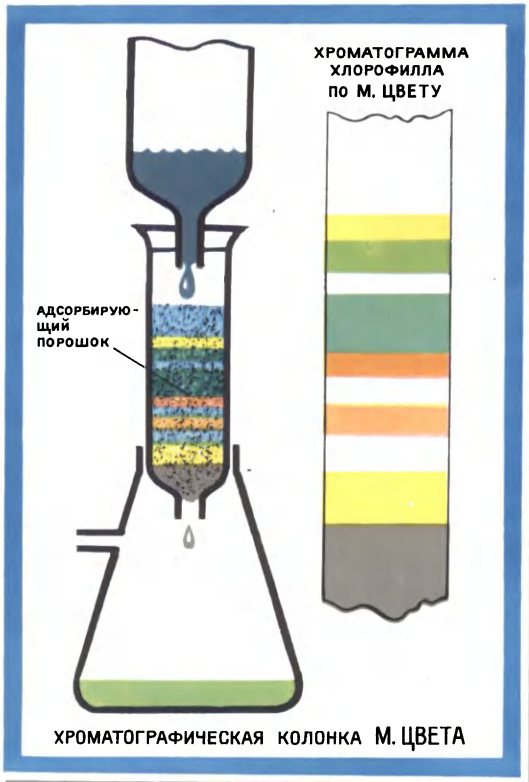
Таким подлинным чудом, чудом, осуществленным самой могущественной силой в мире — человеческим разумом, было создание и открытие 101-го элемента, получившего славное имя «менделевий».

Величайший критерий истинности научных положений — это, бесспорно, возможность предсказания. Результаты хроматографического исследования показали химическое сходство между лантаноидами и трансурановыми элементами. Эти результаты дали исследователям основание **предсказать**, что те трансурановые элементы, которых еще нет, которые еще только должны быть созданы человеком и должны быть

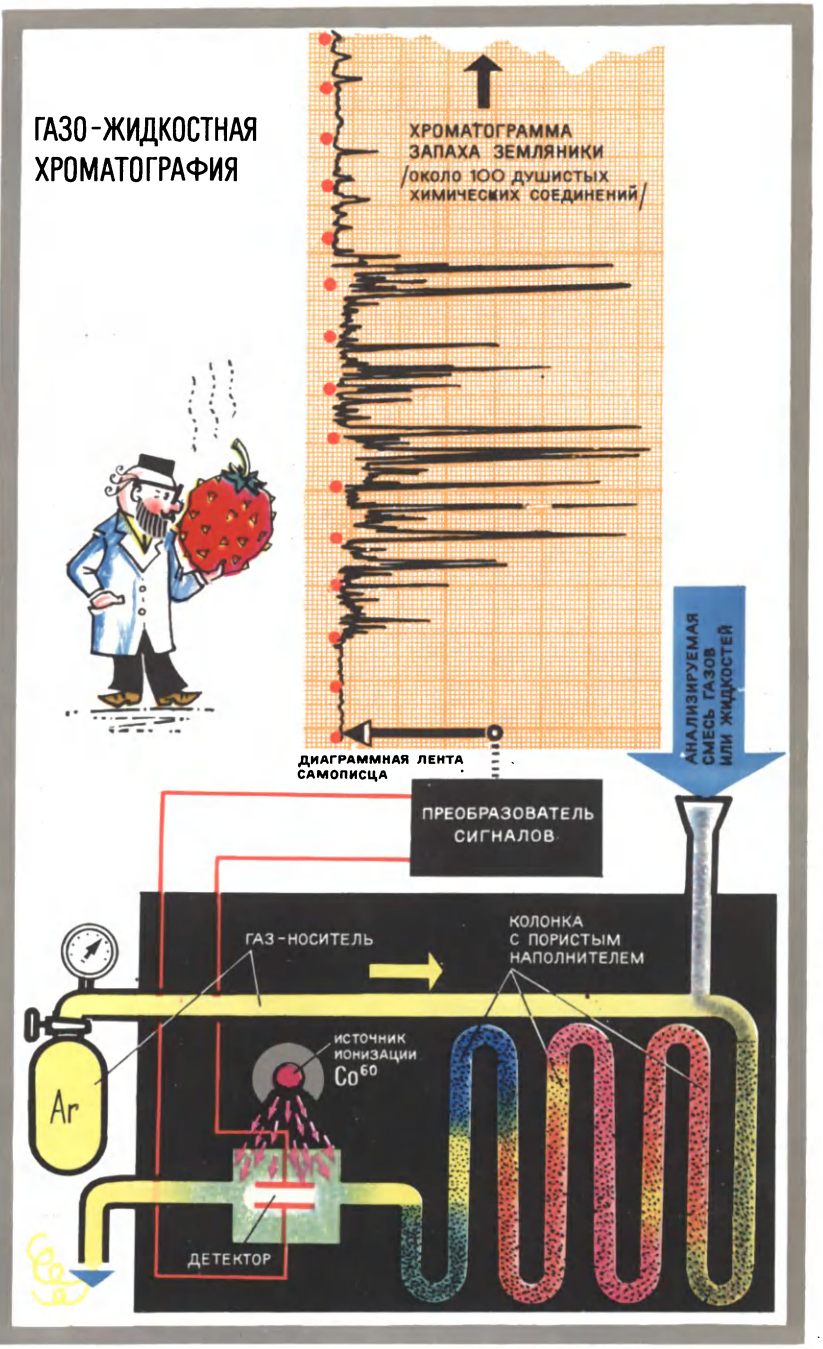
*Таблица к статье «Удивительная судьба одного простого открытия (хроматография)»*

***А*** **— Первая хроматографическая установка профессора М. Цвета. В трубке слева отчетливо видны цветные зоны, соответствующие различным пигментам хлорофилла, извлеченного из зеленых листьев.** ***Б*** **— Хроматограмма запаха свежей земляники, полученная на хроматографе с ионизационным детектором.** ***В*** **— Схема разделения смеси из двух компонентов (красные и черные молекулы) на капиллярной колонке. Сначала молекулы движутся вместе (*1*), затем красные молекулы несколько опережают черные (*2*) и заметно обгоняют их (*3*). При попадании красных молекул в детектор на нулевой линии появляется пик первого компонента (*4—5*), а при попадании в детектор черных молекул на нулевой линии записывается пик второго компонента (*6*).** ***Г*** **— Хроматограмма разделения на бумаге смеси синих и красных чернил. Такую хроматограмму нетрудно получить самому. Внося в центр листка смоченной фильтровальной бумаги каплю смеси красных и синих чернил и аккуратно нанося по каплям чистую воду, вы скоро получите точно такую же картинку.**

А


ХРОМАТОГРАММА ХЛОРОФИЛЛА по М. ЦВЕТУ
АДСОРБИРУЮ-ЩИЙ ПОРОШОК
ХРОМАТОГРАФИЧЕСКАЯ КОЛОНКА М. ЦВЕТА

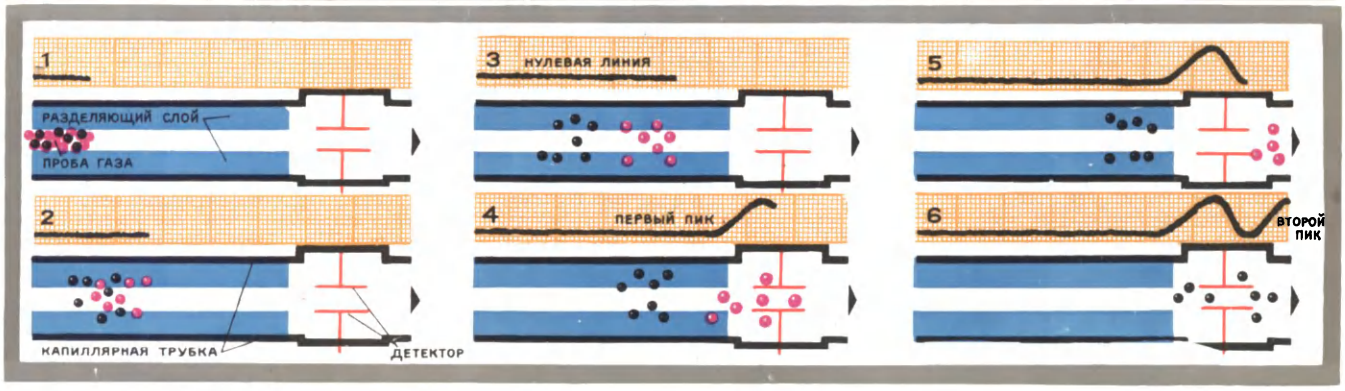
Б


ГАЗО-ЖИДКОСТНАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ
ХРОМАТОГРАММА ЗАПАХА ЗЕМЛЯНИКИ /около 100 душистых химических соединений/
ДИАГРАММНАЯ ЛЕНТА САМОПИСЦА
АНАЛИЗИРУЕМАЯ СМЕСЬ ГАЗОВ ИЛИ ЖИДКОСТЕЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СИГНАЛОВ
ГАЗ-НОСИТЕЛЬ
КОЛОНКА С ПОРИСТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ
источник ионизации Co60
Ar
ДЕТЕКТОР

Г

ХРОМАТОГРАФИЯ НА БУМАГЕ
ФИЛЬТРОВАЛЬНАЯ БУМАГА
РАЗДЕЛЕННЫЕ КОМПОНЕНТЫ СМЕСИ

В


1
РАЗДЕЛЯЮЩИЙ СЛОЙ
ПРОБА ГАЗА
2
КАПИЛЛЯРНАЯ ТРУБКА
ДЕТЕКТОР
3 НУЛЕВАЯ ЛИНИЯ
4 ПЕРВЫЙ ПИК
5
6
ВТОРОЙ ПИК

выделены, изолированы и изучены, которые еще только будут открыты,— элементы с порядковыми номерами 99, 100, 101— должны быть аналогами редкоземельных элементов: гольмия (№ 67), эрбия (№ 68) и тулия (№ 69). Следовательно, их **надо искать** хроматографическим методом в сложной смеси продуктов ядерного синтеза, и на хроматограмме они будут располагаться в строго определенном порядке: точно в таком же, как и их собратья,— сначала 101, затем 100 и, наконец, 99. Это предсказание было настолько исчерпывающим, что можно было заранее предвидеть, в какой по порядку капле раствора, вытекающего из хроматографической колонны, будут содержаться атомы еще не существующего элемента.

Предсказание подтвердилось с поразительной точностью: методами хроматографического анализа были открыты эйнштейний (№ 99) и фермий (№ 100).

Все труднее и труднее достигается ядерный синтез новых элементов. Все короче оказывается период их существования. Все меньше и меньше атомов получают исследователи в конце долгой, трудной и сложной работы. Много труда было положено на открытие элементов 99 и 100. Поиски методов ядерного синтеза, выслеживание новых трансурановых элементов, «охота» за ними напоминают увлекательную приключенческую повесть. Но ни одному писателю-фантасту, ни одному автору детективных и приключенческих романов не могло бы и в голову прийти что-либо похожее на историю открытия 101-го элемента.

Получение последних трансуранов сопровождалось такими трудностями, что в ядерной реакции и ожидать было нельзя сколько-нибудь заметного выхода 101-го элемента. В этом опыте облучалась мишень — золотая пластинка с нанесенным на нее одним миллиардом атомов эйнштейния. Теория и расчет показывали, что за один опыт нельзя было надеяться получить **больше одного атома** элемента № 101.

*Таблица к статье «Удивительная судьба одного простого открытия (хроматография)»*

***Внизу*** **— кольцевая хроматограмма на бумаге сложной смеси шести различных аминокислот, проявленная четырьмя разными реактивами.** ***Вверху справа*** **— двухмерная хроматограмма еще более сложной смеси четырнадцати различных аминокислот. Эта хроматограмма получена из одной капли раствора смеси кислот, нанесенной в точку, обозначенную кружочком. Проявление велось поочередно в двух направлениях разными реактивами. Каждая метка-пятно принадлежит одной аминокислоте. По окраске и положению пятна можно совершенно точно установить природу вещества.** ***Вверху слева*** **— хроматограмма обыкновенного чернильного пятна-кляксы на промокательной бумаге.**

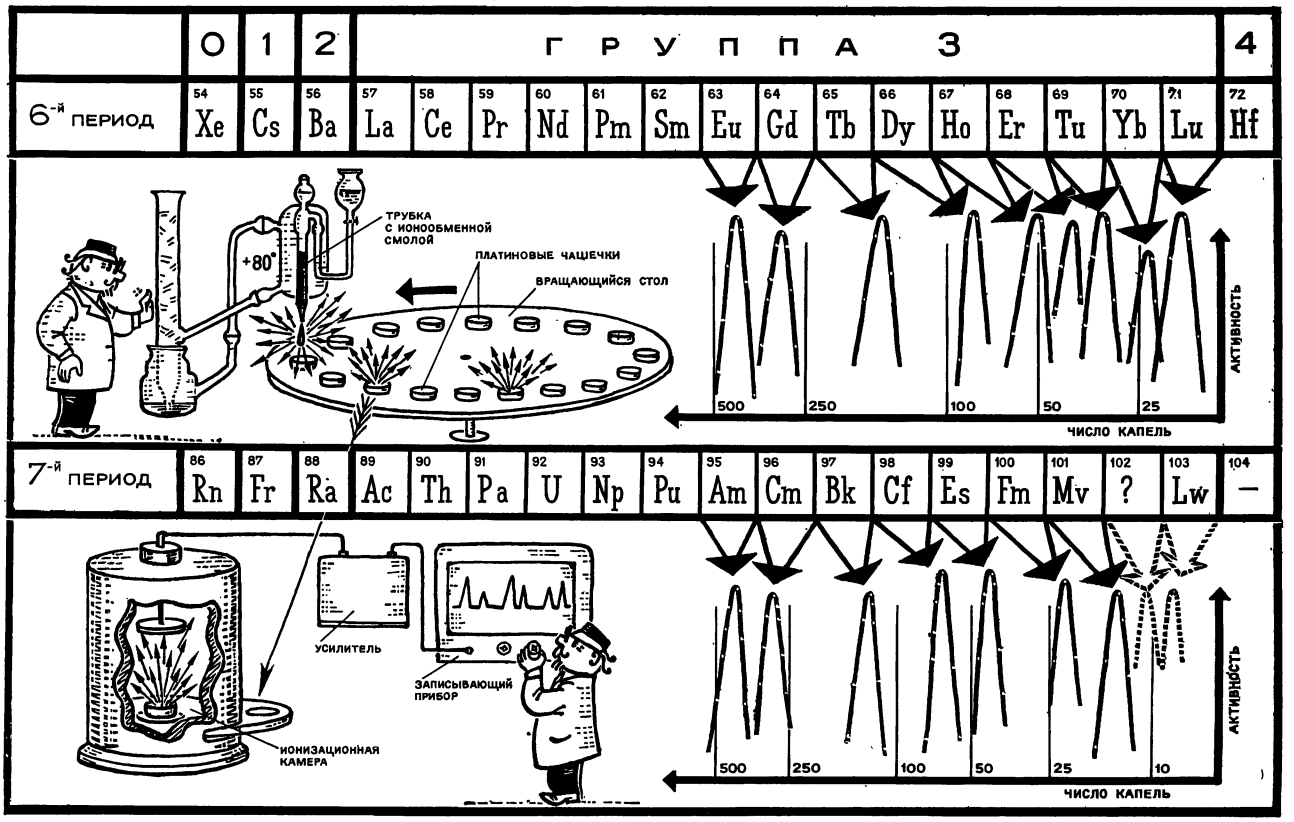
Трудности фантастической «охоты» за **одним-единственным атомом еще не существующего элемента** не испугали известного американского ученого Глена Сиборга. Основываясь на непреложной справедливости закона Менделеева, он вместе со своими сотрудниками предпринял смелый, заведомо долгий и трудный поиск. Залогом успеха в их работе было то, что они уже владели хроматографическим методом. Только благодаря хроматографии можно было по химическому поведению одного или двух атомов правильно судить о химии нового элемента. Каждый атом тысячи и тысячи раз участвует в одних и тех же химических реакциях (адсорбция — растворение). Получается подлинная статистическая картина поведения элемента.

После упорной и долгой работы, после многих и горьких неудач и разочарований отважные исследователи были вознаграждены высшей для ученого наградой — открытием новой тайны природы: им удалось обнаружить **один**(!) атом нового элемента и **установить** его химическую природу.

Вдумайтесь в чудо, совершенное наукой. Исследователи сумели найти один-единственный, впервые возникший по воле человека атом никогда ранее не существовавшего элемента, потому что они заранее знали, где, в какой именно из многих капелек, вытекающих из стеклянной трубочки, **должен** находиться этот неведомый еще атом.

И каждый раз, когда снова и снова повторялся этот удивительный опыт, созданный человеком единственный атом нового элемента послушно и аккуратно выходил из хроматографической колонны точно в заранее предсказанной капле раствора. Часто ученым не удавалось обнаружить ни одного атома, изредка им везло, и они находили **сразу два атома,** но никогда не было, чтобы этот атом оказался в другой, по порядку не соответствующей его химической природе, капельке.

К этой славной победе их привело сочетание глубокой теории и тонкого эксперимента. Беспримерная научная смелость американских ученых не была безрассудной. Ими руководила великая идея Менделеева о периодичности свойств химических элементов. Они умело использовали хроматографический метод профессора Цвета. Точность и непреложность этих двух могущественнейших методов познания природы настолько велики, что для исследователей было достаточно обнаружить и определить в ряде опытов всего только **семнадцать** отдельных




**При помощи ионообменной хроматографии были открыты и исследованы тяжелые трансурановые элементы. На рисунке сопоставлено положение редкоземельных и трансурановых элементов в периодической таблице с хроматограммами изменения активности вытекающего из колонки раствора. На основании аналогии строения и свойств элементов этих двух рядов было предсказано, в каких именно каплях раствора, выходящего из хроматографической колонки, следует искать атомы новых трансурановых элементов. Капли собирались в плоские платиновые чашечки, высушивались, после чего чашечки помещали в ионизационную камеру для измерений радиоактивности. Именно таким образом был открыт менделевий, хотя в каждом опыте у исследователей был всего один атом.**

атомов, чтобы с уверенностью заявить об открытии нового элемента № 101.

В честь Д. И. Менделеева, великого русского ученого, идеи которого были путеводной звездой на долгом и тяжелом пути к созданию новых элементов, они назвали 101-й элемент м е н д е л е в и е м. Увлекательная история его открытия — хороший пример преемственности и дружбы в науке.

## ХРОМАТОГРАФИЯ СЕГОДНЯ...

Хроматография — удивительная наука. Она скромная труженица. Главная ее задача — помогать другим наукам. В наши дни уже ни одна область естествознания не может обойтись без точных, быстрых и беспредельно чувствительных методов хроматографии.

Как аналитический метод хроматография далеко опередила все остальные методы химического анализа. Даже спектральный анализ и тот уже отстает теперь по своей чувствительности от газо-жидкостной хроматографии. Без нее была бы невозможна великая победа физики и ядерной химии — синтез и выделение в чистом виде новых искусственных элементов. Методом ионообменной хроматографии было обнаружено присутствие **одного** атома нового элемента. Конечно, в этом случае задача была облегчена радиоактивными свойствами нового элемента. Но и в других областях науки, например при определении органических соединений, достижения хроматографии совсем недавно показались бы чудом: химики могут теперь уверенно обнаруживать некоторые вещества, даже если они присутствуют в количестве, не превышающем **тысячи** молекул в кубическом сантиметре.

Хроматография помогает химикам разбираться в тончайших различиях химических свойств близких по строению молекул. Благодаря ей стало возможным разделять изомерные молекулы; даже оптические изомеры с успехом разделяются в хроматографической колонне.

Ведь только хроматография дает возможность одновременно определять вещества в одной пробе, не превышающей тысячной доли грамма. Она позволяет быстро и точно обнаружить одновременное присутствие свыше сотни различных сложнейших химических соединений. И химик может любое из них выделить в чистом виде, не разрушая и не изменяя его, что было неизбежным для большинства старых методов аналитической химии.

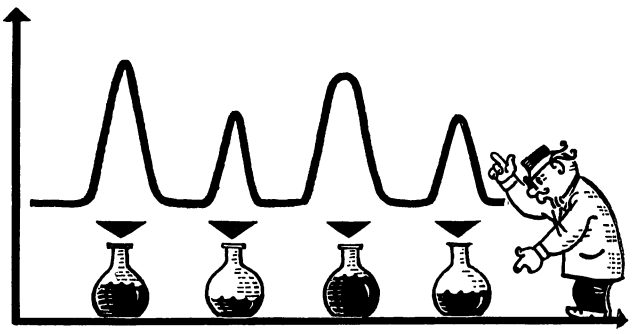
Эти замечательные свойства хроматографии дали возможность биохимикам следить за быстрыми и сложными превращениями веществ в живых организмах и начать изучение механизма протекающих в них бесчисленных и сложнейших химических превращений и тем самым начать штурм величайшей из тайн природы — тайны жизни.

Очень много у хроматографии и чисто практической повседневной работы буквально во всех областях новой техники. В атомных лабораториях и на атомных заводах она помогает ученым и инженерам, работающим в области ядерной химии, выделять новые изотопы; геологам — разгадывать тайну происхождения и состав нефти и искать новые нефтяные и газовые месторождения; инженерам-химикам в лабораториях и на заводах — анализировать сложнейшие смеси природных лекарственных веществ: антибиотиков, гормонов, витаминов, ферментов, алкалоидов и, что еще более важно, получать их в чистом виде; агрохимикам и почвоведам — следить за судьбой удобрений, внесенных в почву, и добиваться высоких и устойчивых урожаев.

## ... И ЗАВТРА

В наши дни роль и значение хроматографии в науке и технике необозримы и необъятны. Но еще удивительнее и фантастичнее ее ближайшее будущее.

Конечно, методы хроматографии будут совершенствоваться, анализы будут более чувствительными, точными и быстрыми. Появятся новые приемы разделения. Уже сейчас разрабатываются хроматографические процессы



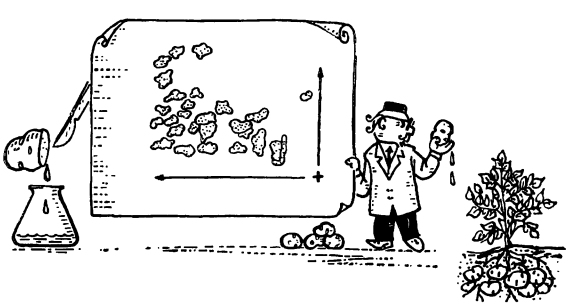
**Каждое новое вещество, выходящее из хроматографической колонки, отмечается на диаграмме сигналом в виде пика. Вещество, выход которого регистрируется таким пиком, можно извлечь из раствора или газовой смеси, собрать и выделить в чистом виде. Этот метод все шире применяется для разделения очень сложных смесей.**

без движущейся среды: газ или растворитель заменяются температурным полем.

Ученые-химики надеются, что скоро хроматография научится не только обнаруживать различные химические соединения, но и определять природу и строение отдельных молекул в сложной смеси. Это откроет перед химической наукой новые необозримые возможности.

Химики и технологи уверены, что скоро будут созданы промышленные методы крупнотоннажного производства хроматографическим путем. При этом будут получаться вещества невиданной чистоты, с новыми замечательными свойствами.

Непревзойденная быстрота газохроматографического анализа и его огромная точность позволяют возложить на хроматографию еще одну неожиданную обязанность — руководить химическим производством. Инженеры-химики мечтают о новых удивительных химических заводах, заводах-автоматах, на которых люди



**Двухмерная хроматограмма сока сырой картошки. Капля сока была нанесена в месте, обозначенном крестиком. По числу пятен видно, что присутствует двадцать семь различных веществ.**

будут освобождены от трудной и опасной работы. Хроматографический автоматический анализатор будет с недостижимой для любого, даже самого опытного аппаратчика точностью и вниманием следить за ходом технологического процесса, следить неотступно и непрерывно, никогда не уставая и не отвлекаясь. Сигналы анализатора о составе продукта будут поступать на быстрорешающее вычислительное устройство, которое сможет немедленно принимать нужное решение и будет автоматически вести производственный процесс в наиболее выгодном режиме, заставляя механизмы выполнять автоматически все необходимые операции. А самое главное в том, что на заводах, управляемых хроматографическими анализаторами, можно будет получать такие вещества, которые другими путями получить невозможно.

Хроматография — путь к химическим заводам-автоматам будущего. Быть может, ты, читатель, построишь первый такой завод! Хроматография тебе поможет!

■

## ХИМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ

Символы ста четырех элементов заполняют клетки периодической системы. Подавляющее большинство из них получено в свободном виде. А между тем в природе химические элементы встречаются главным образом в форме самых разнообразных соединений. Извлечь тот или иной элемент из минерала или горной породы часто нелегко, и сделать это удается с помощью целого комплекса химических процессов. Эти процессы и есть химические реакции.

Количество известных химических соединений — от простейших до самых сложных — превышает 2 млн. Все они, а также и те, с которыми еще предстоит встретиться исследователям,— результат химического взаимодействия элементов, продукт химических реакций. Ежесекундно во Вселенной происходит бесчисленное множество химических реакций.

...Вы пробегаете глазами эти строки, улавливаете их смысл, и в вашем мозге совершаются сотни и тысячи различных химических реакций. Если в стакан крепкого чая положить кусочек лимона, цвет напитка бледнеет: произошла химическая реакция. Топится печь, пляшут яркие огоньки пламени, и от смолистых поленьев остается кучка золы. Это превращение осуществилось благодаря химическим реакциям. Реакция горения — первая химическая реакция, с которой познакомился человек. А потому легенду о Прометее, подарившем людям огонь, можно считать легендой о том, как человек впервые столкнулся с химическими взаимодействиями.

...Весь облик нашей Земли, ее леса и горы, ее почвы и воды созданы химическими превращениями. Уголь, который дает нам электричество; нефть — топливо, приводящее в движение автомобили и самолеты; металлы, выплавленные из руд, —все это продукты химических реакций.

В своем понимании химической реакции человек прошел длинный путь. Дикарь, который с удивлением наблюдал, как молния превращает могучее дерево в уголь и золу, и современные исследователи, которые вплотную подошли к синтезу белка, одного из самых сложных веществ,— вот две крайности в представлениях человека о химических реакциях.

Когда простые или сложные вещества вступают во взаимодействие друг с другом, они обычно дают знать об этом. Стоит бросить в раствор серной кислоты кусочек цинка, как моментально от него побегут пузырьки газа. Пройдет некоторое время, и металл исчезнет. Цинк растворился в кислоте, и выделился водород. Как все это происходило, вы видели своими глазами. Если поджечь комок серы, он загорится голубоватым пламенем, появится удушливый запах. Сера соединилась с кислородом и образовала химическое соединение — сернистый ангидрид. Польем белый порошок безводной сернокислой меди $CuSO_4$ водой, он синеет. Соль соединилась с водой, и образовалось соединение — синие кристаллы медного купороса — $CuSO_4 \cdot 7H_2O$. Вещества такого вида называются *кристаллогидратами*.

Всем знаком процесс гашения извести. Негашеную известь CaO обливают водой, получается «гашенка» $Ca(OH)_2$. Цвет вещества не изменился, но легко убедиться, что реакция прошла. При гашении извести выделяется много тепла.

Химические реакции проходят с выделением или поглощением энергии, чаще всего тепловой. Вот первое непременное условие всех химических реакций. Иногда тепла выделяется так много, что это легко обнаружить на ощупь. Реакции, идущие с выделением тепла, называют экзотермическими.

Гашение извести — это пример экзотермической реакции:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Э.$$

*Э* равно 16 *ккал*

Известно множество экзотермических реакций, где тепла выделяется несравненно больше, например горение бора в кислороде:

$$4B + 3O_2 \rightarrow 2B_2O_3 + 672 \text{ ккал}.$$

Образование озона — хороший пример эндотермической реакции, идущей с поглощением тепла:

$$3O_2 + 69 \text{ ккал} \rightarrow 2O_3.$$

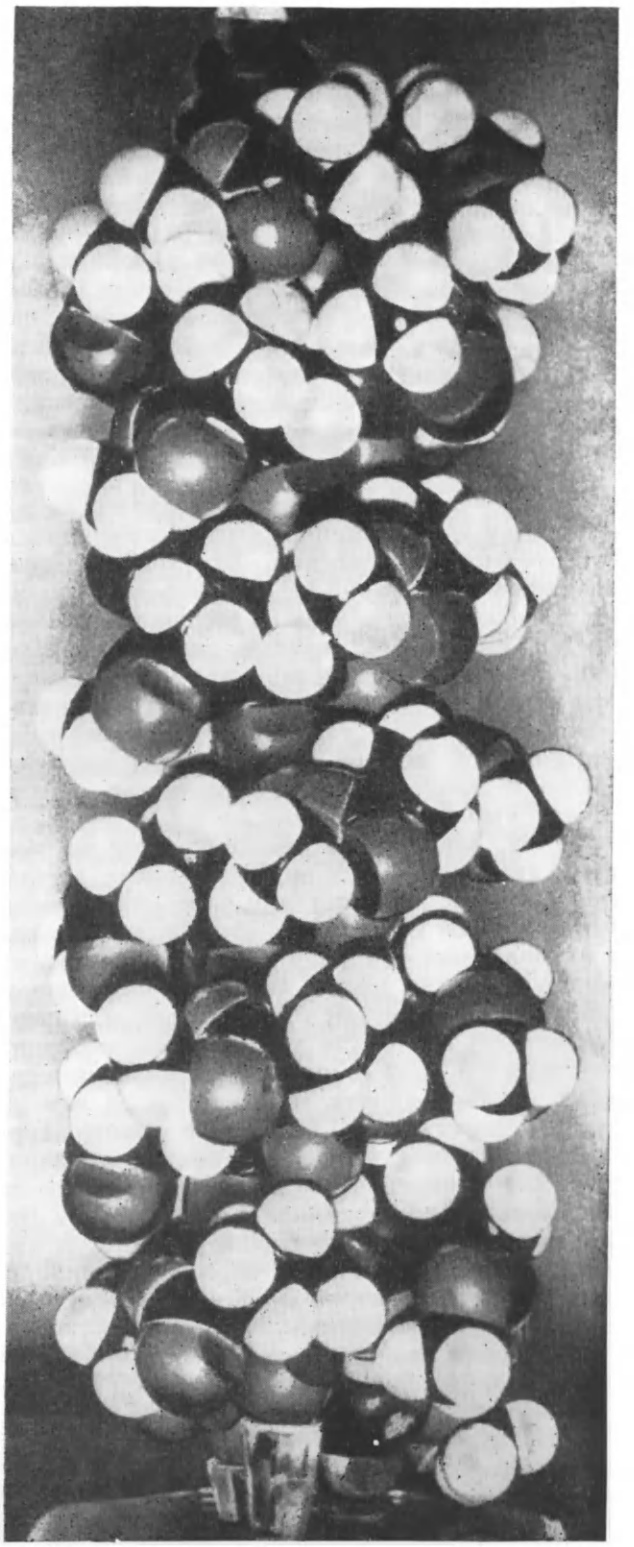
Соединения, которые образуются с выделением энергии, называются экзотермичными. Их гораздо больше, чем соединений эндотермичных, образующихся с поглощением энергии. Таков, например, озон. Все эндотермичные соединения в большей или меньшей степени неустойчивы.

Царство химических реакций — это сложнейшая область, и изучают ее самые различные науки. Чтобы понять, как происходит та или иная реакция, химик призывает на помощь и физику, и математику, и биологию. Он часто нуждается в услугах хитроумных вычислительных машин.

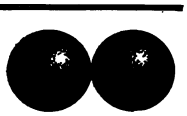
Разные химические процессы протекают с различной скоростью. Одни совершаются мгновенно, другие так медленно, что на первый взгляд кажется, будто реакция не идет совсем. Таких «незаметных» реакций очень много, и среди них есть очень важные, жизненно необходимые для практики, для получения нужных человеку веществ.

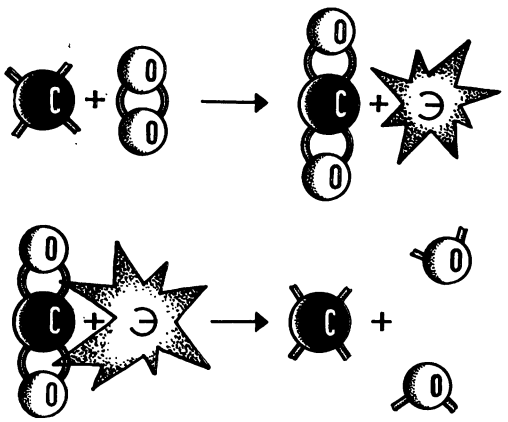
Взрыв — вот пример мгновенной реакции. Здесь счет идет на доли секунды. Твердое взрывчатое вещество превращается в газообразные продукты.

Процесс ржавления, или коррозии, железа наносит громадный убыток человечеству. Более



Самая простая молекула — $H_2$ и одна из самых сложных молекул ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты).






**В ходе химической реакции образуется новое соединение (вещество), происходит выделение или поглощение энергии (*Э*).**

10% производимого металла теряется бесполезно. Коррозия — пример коварного процесса, она протекает постепенно. Вечером железная пластинка будет такой же, как утром, но пройдет несколько дней, и на ее поверхности появляются рыжеватые разводы ржавчины. Процесс коррозии во многом зависит от окружающих условий. В тропических странах, где высокая влажность и жарко, стальные и железные изделия ржавеют быстрее, чем в средних широтах. Обратите внимание, что повышенная температура ускоряет коррозию.

А вот, допустим, в стеклянном сосуде смешаны два газа — водород и кислород, составные части воды. Сосуд при комнатной температуре (15—20°Ц) может стоять сколько угодно, и на поверхности стекла не будет заметно ни единой капельки влаги. Кажется, что водород вовсе и не соединяется с кислородом. Соединение идет, но только чрезвычайно медленно. Чтобы на донышке сосуда образовалась лужица воды, должны пройти тысячелетия. В чем же дело? Оказывается, комнатная температура слишком низка, чтобы водород и кислород вступили в быстрое взаимодействие. Но если нагревать сосуд, стенки его запотевают. Это верный признак протекающей реакции. А при 500°Ц сосуд разлетится на мелкие осколки. При такой температуре образующие воду газы реагируют со взрывом.

Но всегда ли это происходит так? Нет, не всегда. Чтобы образовался один объем водяного пара, нужно взять два объема водорода и один объем кислорода. Эту смесь называют также гремучим газом: при нагревании она взрывается. Если же количество водорода в смеси менее 4% или более 94% (по объему), то такая смесь не взрывоопасна. Скорость химической реакции зависит не только от температуры, но и от концентрации реагирующих продуктов.

Температура и концентрация — вот те важнейшие понятия, которыми оперирует химическая к и н е т и к а — наука о скоростях химических реакций. Ее основной девиз: обеспечить полноту протекания химического процесса, получить наибольший выход нужного продукта. Ради этого химик-кинетик становится и физиком и математиком. И он ставит перед собой задачу — рассчитать химическую реакцию.

Итак, прежде чем смешивать исходные вещества, химик задается вопросом: при какой температуре пойдет реакция? При обычной, комнатной, начинаются немногие. Уголь не загорается сам собой, смесь порошков магния и серы так и остается смесью. Стоит лишь подвести к ним пламя — реакции начинаются тут же.

Почему же тепло способно заводить механизм химического процесса? Вернемся снова к воде. Водород и кислород в свободном виде существуют в форме молекул $H_2$ и $O_2$. Чтобы эти молекулы могли прореагировать, они должны столкнуться. И чем чаще будут такие столкновения, тем вероятнее образование молекулы воды. При комнатной температуре и нормальном давлении каждая молекула водорода должна сталкиваться с молекулой кислорода... более десяти миллиардов раз в секунду. Если бы любое столкновение приводило к химическому взаимодействию, реакция прошла бы быстрее взрыва — за одну десятимиллиардную долю секунды! Но мы не видим в сосуде, где смешаны два объема водорода с одним объемом кислорода, никаких изменений потому, что в обычных условиях очень редкое столкновение приводит к химической реакции. И секрет заключается в том, что сталкиваются молекулы водорода и кислорода.

Прежде чем вступить в реакцию, молекулы должны распасться на атомы. Точнее говоря, валентные связи между атомами кислорода и атомами водорода в их молекулах должны ослабнуть и настолько, чтобы не препятствовать объединению разнородных атомов водорода и кислорода. Температура и играет роль кнута, подстегивающего реакцию. Она во много раз увеличивает число столкновений, делает соударения молекул более энергичными. Это приводит к ослаблению валентных связей в молекулах $H_2$ и $O_2$. А когда водород и кислород получают возможность встретиться на атомарном уровне, они реагируют мгновенно.

Но химика-кинетика такое качественное описание процесса мало удовлетворяет. И он вводит новое понятие: энергия активации. Это та самая энергия, которой должны обладать молекулы, чтобы приобрести способность к химическому взаимодействию.

Даже при обычной температуре среди молекул водорода и кислорода отыщутся такие, у которых энергия равна или больше энергии активации. Потому-то образование воды идет, но чрезвычайно медленно. Слишком мало достаточно энергичных молекул. А высокая температура приводит к тому, что активационного «барьера» достигают многие молекулы.

Роль энергии активации поистине колоссальна. Вообразим себе, что все молекулы стали бы реагировать друг с другом при любых энергиях. Тогда не стоило бы даже говорить о скоростях реакции. Все вещества стали бы очень быстро соединяться друг с другом, и образовывались бы самые устойчивые соединения: окислы, соли. Все металлы моментально бы окислились, все сложные органические вещества разрушились, превратились бы в простые, но более устойчивые соединения, в том числе и вещества, входящие в состав живых клеток. Получился бы странный мир — мир без жизни, без химии, фантастический мир очень устойчивых соединений, не имеющих желания вступать в химические взаимодействия. Вот от таких неслыханных бед сберегает нас существование энергии активации.

Посмотрим теперь, что такое концентрация и какую роль играет она в химических реакциях. Концентрацией называют число молекул реагирующего вещества в каком-нибудь объеме, например в кубическом сантиметре. Чем выше концентрация молекул взаимодействующих веществ, тем чаще они будут сталкиваться, тем быстрее пойдет реакция. Как же повысить концентрацию? Как «зажать» в кубический сантиметр объема побольше молекул?

Вот пример. Синтез аммиака в практической деятельности человека очень важный химический процесс. Три молекулы водорода и одна молекула азота дают две молекулы аммиака: $3H_2+N_2 \rightarrow 2NH_3$. Если при обычном давлении смешать три объема водорода и один объем азота, то будет всего лишь смесь газов. Но вот давление увеличивается, скажем, в 500 раз. Смесь подвергается давлению, равному 500 атмосфер. Скорость реакции увеличивается в 60 с лишним миллиардов раз.

Вспомним теперь основной девиз кинетики: обеспечить полноту протекания химической реакции, получить наибольший выход нужного продукта.

Если реакция идет с малым выходом продукта, то еще надо задуматься, стоит ли тратить время, силы и средства для ее осуществления. Ведь задача химии — служить человеку, служить с толком. В прошлом у химии существовал свой символ: змея, кусающая собственный хвост. Если этот образ перевести на более понятный язык современной науки, то он означает: обратимая химическая реакция. Все химические реакции в принципе обратимы. Два атома водорода и атом кислорода, соединяясь, дают молекулу воды, и одновременно другая молекула воды распадается на составные части. Две противоположные реакции протекают одновременно: образование воды (прямая реакция) и ее распад (обратная реакция). Если скорость прямой реакции равна скорости обратной, то данная система находится в равновесии. И так для любой реакции. В различных реакциях равновесие достигается в разное время: у одних мгновенно, а у других далеко не сразу.

Чтобы девиз кинетики осуществился практически, нужно одно: как можно дольше оттянуть момент наступления равновесия, не допустить, чтобы обратная реакция стала конкурировать с прямой. Здесь приходится ввести еще одно очень важное для мира химических взаимодействий понятие: константа равновесия — важнейший рычаг для управления химическими реакциями.

Константа равновесия реакции — это отношение произведения концентраций образовавшихся веществ к произведению концентраций веществ, первоначально вступивших в реакцию. Вот выражение для константы равновесия процесса синтеза аммиака:

$$K = \frac{[NH_3]^2}{[H_2]^3 \cdot [N_2]}.$$

В числителе — концентрация образовавшегося аммиака $[NH_3]$; так как его две молекулы, то концентрация возведена в квадрат: $[NH_3] \cdot [NH_3] = [NH_3]^2$. Как «построен» знаменатель, легко догадаться.

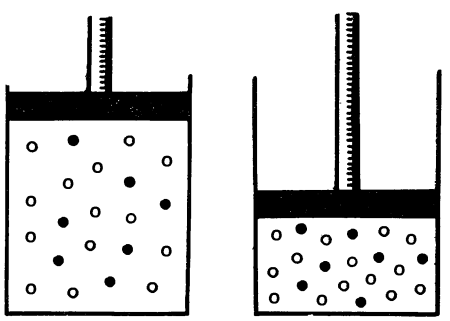
Если химик желает, чтобы та или иная химическая реакция имела практический «резонанс», он должен предварительно выяснить, чему равны значения ее константы равновесия при различных температурах. Всякая дробь тем больше, чем больше ее числитель и чем меньше знаменатель. Чем больше будет концен-

трация образующихся продуктов реакции, тем меньше становится концентрация исходных. Тем большим оказывается значение $K$. Следовательно, тем в более сильной степени прямая реакция преобладает над обратной. Вот к чему в итоге сводится задача химика — к регулировке константы равновесия. А эта регулировка требует знания двух других важнейших понятий кинетики: фактора температуры и фактора давления.

Для иллюстрации главных принципов химического взаимодействия вернемся опять к синтезу аммиака. При комнатной температуре $K$ для синтеза аммиака равна примерно 100 млн. Казалось бы, смесь азота и водорода в таких условиях моментально должна превратиться в аммиак. Но она не превращается. Очень уж мала скорость прямой реакции. А если смесь нагреть до 500°Ц? Однако в таких условиях у нас ровным счетом ничего не получится...

Расчеты кинетики показывают, что при температуре 500°Ц $K$ составляет всего-навсего... шесть тысячных ($6 \cdot 10^{-3}$). Во много раз преобладает обратная реакция: $2NH_3 \rightarrow 3H_2 + N_2$ ... А мы бы так нагревали и нагревали смесь и думали, почему у нас ничего не получается.

Химическая кинетика четко доказала: для синтеза аммиака наиболее выгодны возможно низкая температура и возможно высокое давление. И помог кинетике в этом еще один закон, управляющий миром химических реакций, так называемый принцип Ле Шателье, именуемый в честь открывшего его французского ученого.



**С ростом давления увеличивается концентрация (число молекул реагирующих веществ в единице объема) и число столкновений реагирующих молекул. Поэтому давление увеличивает скорость реакции, которая пропорциональна числу столкновений.**

Представим себе пружину, вделанную в неподвижную опору. Если оставить пружину в покое, можно сказать, что она находится в равновесии. Если сжимать ее или, наоборот, растягивать, пружина из состояния равновесия выходит. Однако одновременно начинает увеличиваться ее упругость, т. е. силы, стремящиеся вернуть ее к равновесию. Они-то и противодействуют сжатию или растяжению пружины. Наконец, наступит момент, когда обе силы уравновешиваются. Пружина снова оказывается в равновесном состоянии. Но это будет уже иное, не начальное равновесие. Оно будет смещено в сторону сжатия или растяжения.

Такое поведение деформируемой пружины аналогично действию принципа Ле Шателье. Вот как его формулирует кинетика: пусть внешняя сила действует на систему, находящуюся в равновесии. Тогда равновесие смещается в сторону, указываемую этим воздействием. Смещается до тех пор, пока силы противодействия не уравняются с внешними.

Опять призовем на помощь реакцию синтеза аммиака. Она, как известно, обратимая:

$$3H_2 + N_2 \rightleftarrows 2NH_3.$$

Из четырех объемов газов получаются два. Увеличивается давление, и это приводит к уменьшению объема. Следовательно, реакция смещается вправо. «Пружина» сжимается. Выход аммиака увеличивается.

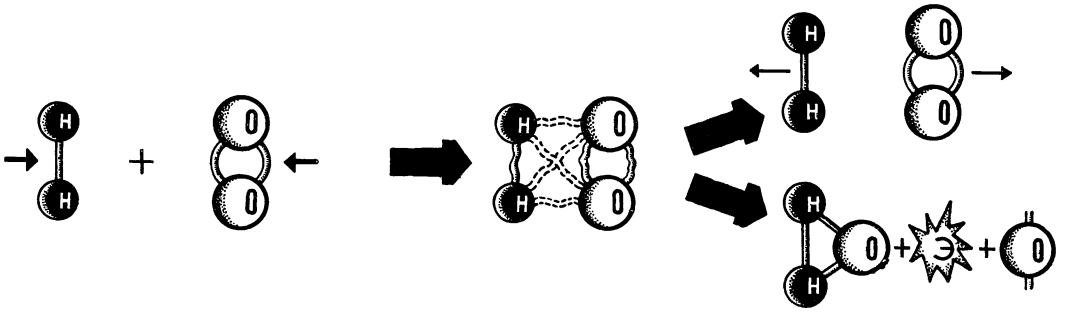
Но любая реакция сопровождается выделением или поглощением тепла. При синтезе аммиака тепло выделяется:

$$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3 + Э.$$

Если нагревать смесь, то реакция пойдет справа налево. Обратная реакция будет преобладать над прямой. «Пружина» растягивается. В обоих случаях установится новое равновесие. Но в первом оно будет соответствовать увеличению выхода аммиака, а во втором — резкому уменьшению.

Видите, какой сложной оказывается на деле как будто бы нехитрая реакция синтеза аммиака, как тщательно приходится подбирать наилучшие условия температуры и давления. Но и эти факторы еще не все, чтобы можно было говорить об успешном получении аммиака с большим выходом продукта.

Теперь вернемся к стеклянному сосуду, где заключена смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода и где не удается обнаружить ни единой капельки воды. Не нарушая герметичности сосуда, введем в него тонкую платиновую проволочку. И вот неожиданность. Проволочка нагревается, а сосуд наполняется туманом — водяными парами.




**Химическая реакция между молекулами исходных веществ происходит только в том случае, если кинетическая энергия столкнувшихся молекул достаточна для образования промежуточного соединения и разрыва старых связей молекул.**

Температура осталась неизменной, давление осталось таким же, а реакция, рассчитанная на тысячелетия, прошла в считанные секунды. Извлечем платиновую проволочку обратно, она совершенно не изменилась. Ее внешний вид, ее химический состав, ее вес после опыта точно такие же, какие были до опыта.

Мы оказались свидетелями очень важного явления в мире химических реакций. Это явление называется к а т а л и з о м. А вещества, в данном случае платина, которые во много раз ускоряют реакцию, сами при этом ничуть не меняясь, именуются к а т а л и з а т о р а м и. Катализаторов неисчислимое количество. Ими могут быть металлы — твердые и порошкообразные; окислы самых различных элементов; соли, основания в чистом виде и в виде смесей (см. цвет. табл. к стр. 377).

Важнейшие процессы химической технологии, например синтез аммиака, не обходятся без катализаторов. Самое обычное металлическое железо с примесью окислов алюминия и калия значительно ускоряет эту реакцию. Химия XX в. обязана своим неслыханным расцветом именно применению катализаторов. Разнообразные жизненные процессы протекают в животных и растительных организмах благодаря специальным катализаторам — энзимам.

Химия неживого и живого — вот сфера действия удивительных ускорителей.

Но не всякий катализатор может ускорять данный процесс. Химики говорят, что катализаторы обладают избирательностью действия: могут активно влиять на одну реакцию, совершенно не обращая внимания на другую. Конечно, есть и исключения из этого правила. Скажем, та же окись алюминия способна катализировать несколько десятков реакций и в неорганической и в органической химии. А на синтез аммиака влияют различные катализаторы. Наконец, разные катализаторы могут заставить смесь одних и тех же веществ реагировать по-разному, давать различные продукты.

Есть, оказывается, вещества не менее удивительные — промоторы. Взятые сами по себе, они равнодушно относятся к реакции. Взятые как примесь к катализатору, они ускоряют реакцию в гораздо большей степени, чем это сделал бы «одинокий» катализатор. Платиновая проволочка, «загрязненная» железом, аммиаком или двуокисью кремния, произвела бы в смеси водорода и кислорода еще более впечатляющий эффект.

Почему же все-таки катализаторы ускоряют химические реакции?

Как будто бы действие катализатора подобно увеличению температуры. В сосуде образуются пары воды, если нагреть его на несколько сот градусов или же внести проволочку из платины. Результат один, а достигнут он разными способами. Для того чтобы нагреть сосуд, надо привлечь энергию извне. Тепло увеличивает количество активированных молекул и константу равновесия для реакции водорода и кислорода.

Катализатор не вносит никакой дополнительной энергии. Он совершенно не влияет на константу равновесия. Он лишь помогает достичь равновесия в реакции образования воды и ускоряет во много раз наступление этого равновесия. Катализатор снижает энергию активации молекул водорода и кислорода, ту энергию, которая необходима для их быстрого химического взаимодействия. Платиновая проволочка разогревается благодаря теплу, выделяющемуся при стремительно происходящем синтезе воды.

Отчего же понижается энергия активации? В присутствии катализатора реакция протекает через образование неустойчивых промежуточных соединений. Для этого требуется меньшая энергия активации. Не такая большая, как для прямого взаимодействия кислорода

и водорода. Вот почему проволочка из платины и произвела в смеси водорода и кислорода столь впечатляющее действие.

Есть, оказывается, кроме катализа положительного, катализ отрицательный, когда присутствие катализатора не убыстряет, а, наоборот, замедляет течение реакций. Такие антикатализаторы носят название ингибиторов. Известны, например, ингибиторы коррозии. Они снижают скорость коррозии металлических изделий. Очень эффективными замедлителями коррозии считаются, в частности, соли хрома и технеция ($K_2CrO_4$, $KTcO_4$) и множество других органических и неорганических веществ. Есть ингибиторы окисления нефтепродуктов, ингибиторы полимеризации и пр. Катализ, наконец, бывает гомогенный и гетерогенный. В первом случае и катализатор и реагирующие вещества образуют однородную систему. Окисление окиси углерода CO до углекислого газа $CO_2$ в присутствии паров воды — вот один из примеров гомогенного катализа. При гетерогенном катализе реагирующие вещества и катализатор находятся в разных фазах. Так, химическое взаимодействие между газами ускоряется твердым катализатором (синтез аммиака).

Ежегодно в мире появляются сотни статей и десятки книг, посвященных изучению катализа. И многие ученые разных стран пытаются постигнуть причину каталитического действия. Одни считают, что активность катализатора зависит от его химического строения. Другие полагают, что катализ происходит в том случае, когда молекулы катализатора устроены подобно молекулам реагирующих веществ. Третьи не без основания ищут причину катализа в особых свойствах поверхности катализатора.

Катализ хранит достаточно неопознанных тайн. Их хватит и на вашу долю.

Студентам на лекции, посвященной химическим реакциям, демонстрируют очень впечатляющий опыт. В стеклянной колбе содержится смесь двух газов — хлора и водорода. При обычной температуре они реагируют очень медленно. Но колба почему-то упрятана под колпак из толстой проволоки. Затем лектор подносит спичку к магниевой стружке, держа ее вблизи колпака. Стружка вспыхивает ярким пламенем, происходит взрыв. Это цепная реакция взаимодействия хлора с водородом.

В мире химических процессов может существовать еще один вид реакций— цепные.

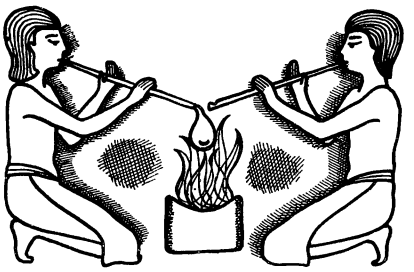
Если нагреть колбу до 700°Ц, она тоже взорвется. Хлор и водород соединяются мгновенно, за долю секунды. Это и не удивительно. Ведь тепло во много раз повышает энергию активации молекул. Но в опыте, о котором мы только что рассказали, температура нисколько не менялась. Эту реакцию вызвал свет. Кванты, мельчайшие «порции» света, несут большую энергию, гораздо больше той, что требуется для активирования молекулы. Вот на пути светового кванта встречается молекула хлора. Квант ($h\upsilon$) разделяет ее на атомы и передает им свою энергию.

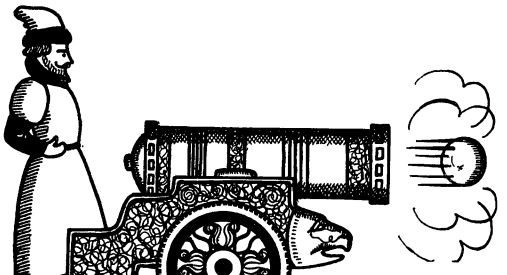
$$Cl_2 + h\nu \rightarrow Cl^* + Cl^*.$$

Атомы хлора оказываются в возбужденном, богатом энергией состоянии (отмечены звездочками). Такие атомы обрушиваются на молекулы водорода, разрывают их на атомы. Один из них соединяется с атомом хлора, другой остается на свободе:

$$Cl^* + H_2 \rightarrow HCl + H^*.$$

Но он возбужден. Он жаждет поделиться своей энергией с молекулой хлора. Как только он





Реакция горения в истории человечества: у первобытного человека; ...в древнем

с ней сталкивается, молекуле хлора приходит конец:

$$Cl_2 + H^* \rightarrow HCl + Cl^*.$$

И опять на свободе оказывается активный хлорный атом, и он недолго ищет, куда приложить свою силу:

$$Cl^* + H_2 \rightarrow HCl + H^*,$$

И так получается длинная последовательная цепочка реакций; в ней повторяются все те «шаги», которые мы только что изобразили на бумаге. Стоит реакции начаться, как все новые и новые молекулы будут активироваться благодаря той самой энергии, которая выделяется в результате реакции. Скорость реакции нарастает подобно снежной лавине, несущейся с гор. Когда лавина достигнет подножия горы, она замирает.

Цепная реакция затихает, когда все молекулы будут увлечены ею, все молекулы водорода и хлора прореагируют. Каждая активированная светом молекула $H_2$ или $Cl_2$ создает около 100 000 элементарных реакций образования хлористого водорода.

Химики знают множество цепных реакций. Известны цепные реакции и физикам. Например, деление ядер урана нейтронами — пример физической цепной реакции.

Само слово «химия» стало теперь понятием собирательным, объединяющим внушительное количество научных дисциплин. Эти направления тоже изучают вещества и их превращения, но каждое направление — своими методами и способами, со своими целями и задачами. Каждое направление имеет ныне вполне самостоятельное значение.

Скажем, химия и электричество нашли общие интересы. Общность интересов породила

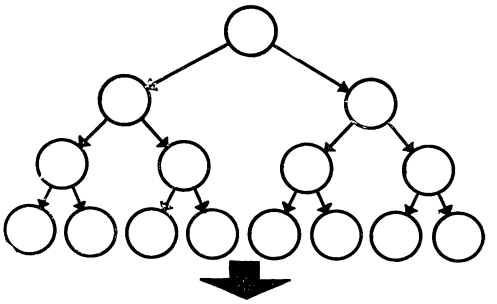
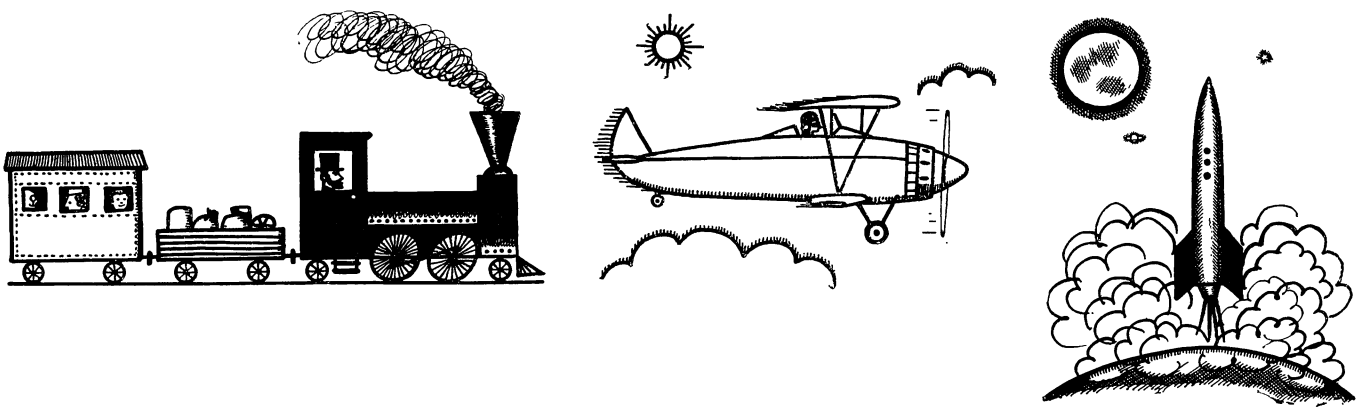


Схема цепной реакции.

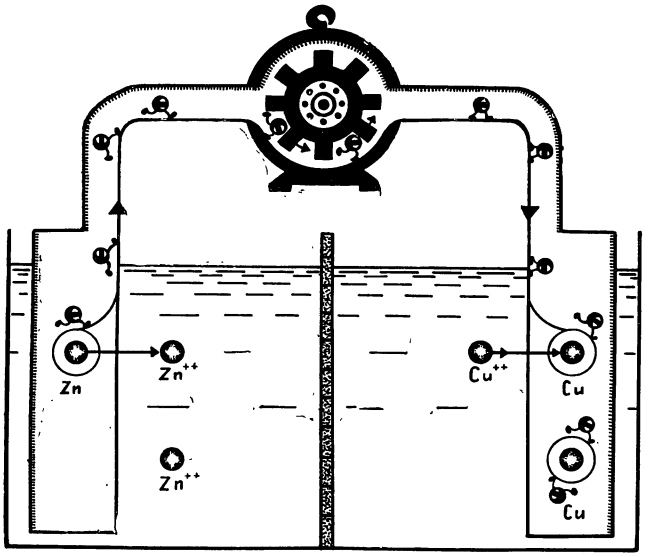
новую науку — электрохимию (см. ст. «Большая задача электрохимии»).

Когда вы включаете карманный фонарик, то знайте, что лучик света, прорезавший ночную тьму, — это результат электрохимической реакции, которая произошла в батарейке. Вы держите в руках нержавеющую хромированную ложку. Хромовое покрытие нанесено на стальной предмет благодаря электрохимическому процессу — электролизу. Электрический ток выделил из раствора хромовых солей металл и осадил его на поверхность ложки.

Свет и химия, объединившись, дали начало фотохимии. Эта наука изучает химические реакции, протекающие под действием света. С ней знаком каждый, кто занимается фотографией. Пленка покрывается специальной эмульсией, в состав которой входит бромистое серебро AgBr. Под действием света его молекула распадается на атомы. Куда упало больше света, там и образовалось больше атомов серебра. Поэтому на кадре потемнения распределяются неравномерно, и эта неравномерность создает общий контур будущей фотокарточки.



Египте; ... в XVIII в.; ... в XIX в.; ... в XX в.; ... в наши дни.



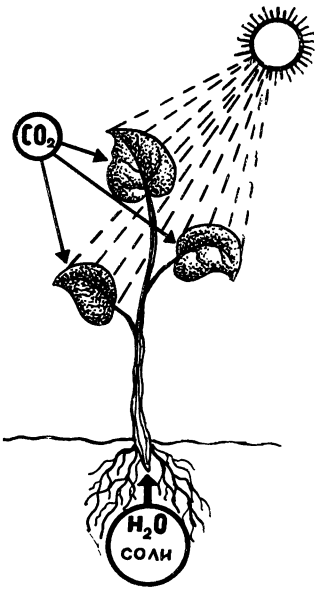

**В гальваническом элементе электроны, переходящие от атомов цинка к ионам меди, совершают работу за счет энергии химической реакции превращения атома цинка в ион цинка, а иона меди — в атом меди. Энергия химической реакции преобразуется в электрическую.**

А вот еще один фотохимический процесс. Именно благодаря ему на Земле существует кислород, которым мы дышим. Благодаря ему на нашей планете растет великое множество растений. Под влиянием солнечного луча в зеленом листе из углекислого газа воздуха и воды, которую растение добывает из почвы, ежесекундно синтезируются ценнейшие углеводы и выделяется кислород. Процесс этот называется фотосинтезом. Каждый зеленый листочек — настоящая химическая фабрика, где происходят тысячи сложнейших химических реакций.

Ученые еще не познали до конца процесс фотосинтеза. И, может, одна из главных задач будущей химии — изобрести искусственный «лист», в котором совершались бы те же самые процессы, что и в природе...

Когда химия применила для своих нужд радиоактивные излучения, родилась ее новая область — радиационная химия. Она сразу дала заметный практический выход. Например, начало развиваться производство высококачественных пластмасс с помощью радиационно-химической полимеризации мономеров. Радиационная химия предложила новые способы вулканизации каучука. Изготовленная таким путем резина отличается большой износоустойчивостью.

Или взять радиационный крекинг. Крекингом называется процесс расщепления сложных соединений, образующих нефть. При этом нефть обогащается простыми, легкими углеводородами как насыщенными, так и ненасыщенными, из которых получают многие ценные органические продукты. Обычный крекинг проводят при высокой температуре и в присутствии катализатора. Радиационный крекинг этих условий не требует. Сильное гамма-облучение образцов нефти в короткий срок производит расщепление тяжелых углеводородов. В других условиях облучение может вызвать и обратный процесс. Из легких углеводородов — метана и этана — получают сложные ценные вещества — альдегиды, кетоны и органические кислоты.




**Энергия Солнца вызывает в зеленом листе растения удивительную и очень важную реакцию фотосинтеза. Из простых неорганических соединений образуются углеводы.**

Ученые ищут пути, как непосредственно из азота получить азотную кислоту под действием радиоактивных излучений.

Вот они, первые достижения радиационной химии, а раскрывшиеся перед ней горизонты поистине необозримы.

... Все, что было создано на Земле до человека, все, что он создал, и все, что он создаст в будущем, — это результат химических реакций, которые так же многообразны, как сам мир.

■

* * *

**Аристотель: «Наука возникла от удивления».**

* * *

**Луи де Вройль: «Наука — дочь удивления и любопытства».**

* * *

**Не забывайте немецкой пословицы: «Ганс не знает того, что не выучил Гансик».**

* * *

**Бэкон: «Человек познает в споре».**

* * *

**Во время публичной лекции, прочитанной детям, Фарадей показывал свечу с «Роял Джорджа», которая вместе с кораблем 57 лет пролежала на дне моря. Свеча прекрасно горела**

# БОЛЬШАЯ ЗАДАЧА ЭЛЕКТРОХИМИИ
## (топливные элементы)

### ПОЧЕМУ НЕВЫГОДНА ТЕПЛОВАЯ МАШИНА

Трудно представить себе нашу жизнь без электрической энергии. Электричество освещает наши города и села, плавит металл в электропечах, приводит в движение миллионы станков, питает радиостанции и совершает тысячи других полезных дел.

Около 80% электроэнергии дают тепловые станции, где в гигантских котельных сжигают уголь, сланцы, торф, природный газ, и лишь 20% электроэнергии вырабатывают гидростанции.

Усилия ученых направлены на совершенствование процесса получения электроэнергии из топлива.

Процесс этот выглядит так. При химической реакции горения (окисления) топлива выделяется энергия тепловая, благодаря ей в котле расширяется пар и приводит в действие лопасти паровой турбины — появляется энергия механическая. Механическая энергия в свою очередь побуждает к работе электрический генератор. Так возникает целая цепочка превращения энергии:

энергия химическая → энергия тепловая → энергия механическая → энергия электрическая

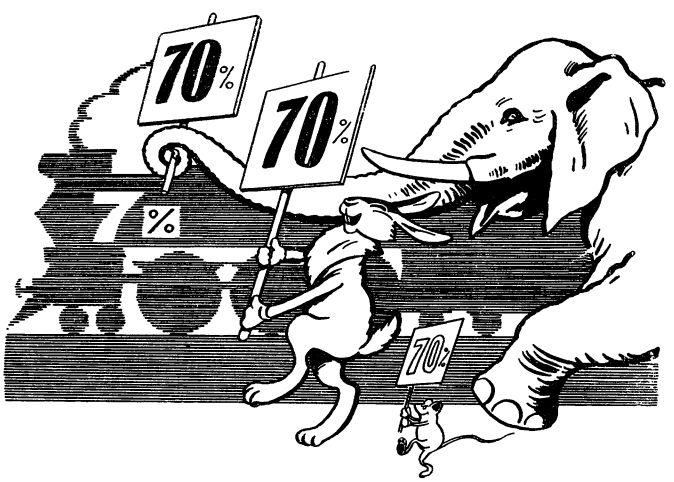
По закону сохранения энергии при каждом преобразовании энергии общее ее количество не изменяется, энергия не теряется безвозвратно и не возникает из ничего. Казалось бы, для практики безразлично, каким образом один вид энергии превращается в другой. На самом же деле это не так — разные виды энергии неравноценны.

Механическую и электрическую энергию можно непосредственно и полностью использовать в виде любой полезной работы и полностью превратить в любой другой вид энергии. Иначе обстоит дело с тепловой энергией. Если мы попытаемся превратить тепловую энергию в механическую, какая-то ее доля всегда останется неиспользованной. Отношение количества энергии, которое можно использовать для превращения в механическую, к общему количеству тепловой энергии называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.) процесса превращения энергии.

К. п. д. тепловых машин зависит от их рабочих температур. Обычно он не превышает 30% (у паровоза даже 7%) и лишь у самых совершенных машин достигает 40%. Это значит, что больше половины тепловой энергии и в переносном и в буквальном смысле вылетает в трубу. Ясно, что тепловая машина — устройство малоэффективное.

Много лет ученые пытаются повысить к. п. д. тепловых машин — совершенствуют конструкции агрегатов, увеличивают их мощность и т. д. Но повышение к. п. д. сверх 40% связано с большими трудностями. Поэтому заманчива другая идея — полностью отказаться от тепловых машин и использовать химическую энергию окисления топлива, **минуя промежуточное выделение тепловой энергии.**

На принципиальную возможность такого превращения указывает нам окружающая природа. Любой организм черпает необходимую энергию из органических видов топлива — пищевых продуктов. В организме происходит то же самое окисление топлива, что и в тепловой машине, образуются те же конечные продукты реакции — вода и углекислый газ. Но в машине окисление происходит с выделением тепловой энергии, что вызывает сильное нагревание среды, а в организме энергия выделяется в основном в виде механической энергии мускульных сокращений, и температура окружающего пространства почти не повышается. Коэффициент




**Коэффициент преобразования энергии в живом организме достигает 60—70%. Такие высокие показатели немыслимы для самых совершенных тепловых машин.**

преобразования энергии в живом организме достигает 60—70%. О таких показателях конструкторы тепловых машин даже и не мечтают.

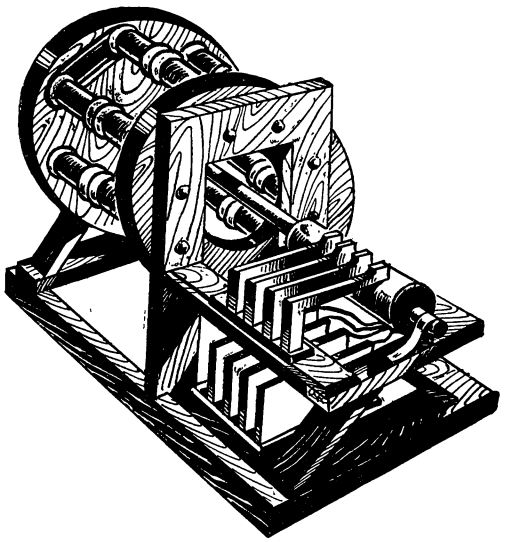
Итак, химическая энергия может превращаться прямо в механическую. А прямо в электрическую?

## ЭЛЕКТРОХИМИЯ И УЧЕНИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Проблемой непосредственного превращения химической энергии в электрическую и электрической в химическую занимается электрохимия. Эта наука зародилась в самом начале XIX в. В наши дни она переживает свою вторую молодость.

Электрохимические реакции отличаются от обычных химических реакций тем, что в них участвуют свободные электроны. В ходе такой реакции свободные электроны либо выделяются, либо поглощаются. Примерами первых реакций могут служить реакции растворения металлов: $Zn \rightarrow Zn^{+2} + 2e$

**В первой половине XIX в. единственными практическими источниками электрического тока были гальванические элементы — электрохимические источники тока. С их помощью стали возможны многочисленные открытия в области теории электричества.**



**В 1834 г. петербургский академик Б. С. Якоби создал первый электрический двигатель. Он действовал от электрохимического источника тока.**

или реакции выделения кислорода на положительном электроде при электролизе воды:

$$4OH^- \rightarrow 2H_2O + O_2 + 4e.$$

Реакции с отдачей электронов окислительные (металлический цинк, отдавая электроны, окисляется до двухвалентного состояния). В качестве примера вторых, восстановительных реакций назовем реакции отложения металлов из растворов, например $Cu^{+2} + 2e \rightarrow Cu$, или реакцию электролитического выделения водорода: $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$.

Электрохимические реакции протекают на поверхности металлических электродов, погруженных в раствор электролита. Электроны в обычных условиях не могут существовать в водном растворе в свободном состоянии; поэтому их и подводят к реагирующим веществам или отводят от них по электроду.

Электрохимические реакции играют большую роль в технике. В течение почти всей первой половины XIX в. единственными источниками электрического тока, которые помогали совершать многочисленные открытия в области теории электричества, были электрохимические источники тока, или гальванические элементы (см. ст. «Электромагнитное поле»). Без этих источников невозможно себе представить ни развития представлений об электромагнетизме, ни создания основ электротехники, ни даже появления первых электромагнитных двигателей и

генераторов. Зарождение электроэнергетики неразрывно связано с электрохимическими источниками тока и электрохимическими реакциями, с превращением химической энергии в электрическую.

## ЭЛЕКТРОХИМИЯ В СОВРЕМЕННОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

Во второй половине XIX в. электрохимические источники тока уступили место электромагнитным генераторам, оказавшимся более удобными для производства электроэнергии в больших масштабах. Но сама электрохимия продолжала развиваться. Появились большие электрохимические производства. С помощью электролиза стали получать не только водород и кислород, хлор и щелочи, но и такие металлы, как магний и алюминий, занимающие почетное место во многих отраслях современной техники. Техника начала требовать материалы высокой чистоты, а электрохимические методы — растворение и осаждение — помогли получить чистую медь и другие чистые металлы.

Существует электрохимический процесс, который приносит человечеству миллиардные убытки. Это процесс коррозии металлов.

Заметим попутно, что электрохимические реакции не всегда приносят пользу. Есть электрохимический процесс, который приносит человечеству неисчислимые убытки. Это коррозия металлов, уносящая каждый год десятую долю всего выплавляемого железа. Перед лицом такого бедствия электрохимикам приходится изобретать средства не только для ускорения электрохимических реакций, но и для их замедления.

Электрохимические методы помогают химикам обнаруживать при анализе различные вещества. С помощью особого прибора — полярографа можно осаждать на поверхности ртутной капли малейшие количества вещества из раствора и регистрировать их. Существуют электрохимические приборы, которые улавливают и регистрируют звуковые колебания, измеряют давление, ускорение, вибрации и разнообразные другие физические величины.

Электрохимические реакции хороши тем, что их скорость можно регулировать довольно простыми способами. Это очень важно, когда имеешь дело с несколькими реакциями одновременно. Замедляя одни реакции и ускоряя другие, можно направить общее течение процессов в желаемое русло, т. е. управлять процессами. Поэтому одним из важнейших разделов электрохимической теории, начавшей по-настоящему развиваться в 30-х годах нынешнего столетия, стало учение о скорости электрохимических реакций, или электрохимическая кинетика. Исследование основных законов электрохимической кинетики позволило усовершенствовать важнейшие электрохимические процессы, в том числе и те, которые были присущи первым источникам тока — гальваническим элементам.

## ЭНЕРГЕТИКА БОЛЬШАЯ И МАЛАЯ

Электрохимические источники тока к концу прошлого века почти полностью потеряли свое значение как источники электроэнергии. Они не могли конкурировать с промышленными электростанциями. И все же ученые вынуждены были вернуться к ним и заняться их изучением и совершенствованием. Этого требовала жизнь. Переносной радиоаппаратуре требовались автономные (не связанные с электрической сетью) источники питания, надежные и удобные. В таких источниках испытывают нужду и средства транспорта — самолеты, автомобили, а теперь и космические корабли. За последние тридцать

лет для этих целей созданы десятки типов гальванических элементов и аккумуляторов, достаточно мощных и энергоемких.

Но как бы ни были совершенны гальванические элементы и аккумуляторы, если можно воспользоваться электроэнергией от сети, конкурировать с электрогенераторами они не в силах. Поэтому наметилось совершенно четкое деление способов выработки и потребления энергии: в «большой энергетике» электрическая энергия вырабатывается на электростанциях и распределяется по сетям к потребителю, в «малой энергетике» применяют автономные, малогабаритные, но и относительно маломощные источники электроэнергии для питания аппаратуры, которая не может быть присоединена к электросети.

И в той и в другой области электроэнергию получают за счет химической энергии окисления топлива. В электрохимических источниках тока превращение происходит прямо и непосредственно, с большим к. п. д. Тепловым станциям, как мы уже убедились, свойственно многоступенчатое превращение энергии, и к. п. д. там невысок. Создается парадоксальное положение: энергетика отдает предпочтение не простому и выгодному электрохимическому методу, а сложному и неэффективному многоступенчатому превращению.

Парадокс этот вызван прежде всего экономическими соображениями. В котельных тепловых электростанций сжигают дешевое природное топливо; в электрохимических же источниках тока издавна использовали такие экзотические (с экономической точки зрения) виды «топлива», как цинк, магний, свинец или в лучшем случае железо. Ясно, что никакой к. п. д. не окупит расходы на такое «топливо». Кроме того, тепловая энергетика пользуется даровым окислителем — кислородом воздуха, а электрохимические источники тока требуют в качестве окислителей все ту же «экзотику», например двуокись марганца, а иногда даже окись серебра.

Вторым существенным недостатком электрохимических элементов была прерывистость их действия. В элемент заложен определенный запас активных материалов («топлива» и окислителя), рассчитанный на выработку какого-то количества электрической энергии. Запас израсходован, и элемент надо заменять другим или перезаряжать. Тепловая же машина работает непрерывно, топливо и окислитель подводят к ней без перебоев.

Как же преодолеть эти противоречия? Очевидно, надо подумать над тем, как применить электрохимический метод к обычному топливу и как сделать процесс непрерывным. Если бы все это удалось, расход топлива на производство электроэнергии сократился бы в полтора, а то и в два раза.

## ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Вот уже почти **столетие** ученые многих стран ищут пути прямого преобразования химической энергии дешевого топлива в электрическую. Создать **топливные элементы** оказалось чрезвычайно трудно. Во-первых, обычное топливо так медленно поддавалось электрохимическому окислению, что о мало-мальски приемлемой мощности не могло быть и речи. Во-вторых, топливные элементы были чрезвычайно недолговечными. Их свойства быстро ухудшались, электрические характеристики падали, и элементы теряли всякую работоспособность. До середины текущего столетия проблема создания надежных и эффективных топливных элементов многим казалась почти неразрешимой и бесперспективной.

Но энтузиасты-исследователи продолжали развивать теоретические основы электрохимии, они искали новые материалы и новые катализаторы, и их исследования увенчались успехом. Теперь они говорят с полной уверенностью: проблема будет решена и решена сравнительно скоро. Об этом свидетельствуют новые образцы топливных элементов.

Как же они устроены?

Топливный элемент существенно отличается от обычного гальванического элемента старого типа. Топливо и окислитель, необходимые для электрохимической реакции, не закладываются в него заранее, а непрерывно подводятся к нему в процессе работы. Для удобства подвода компонентов желательно, чтобы они были в газообразном или жидком состоянии. От тепловой машины топливный элемент отличается тем, что окисление происходит в нем не химическим путем (путем горения), а электрохимическим.

При обычном химическом окислении электроны с молекул топлива переходят на частицы окислителя. Если бы этот переход был упорядочен, т. е. совершался преимущественно в одном направлении, мы получили бы электрический ток. Но в пламени частицы топлива и окислителя перемешаны и электронный переход совершается хаотично, во всех направлениях. Энергия процесса рассеивается в виде тепла.

Смысл **электрохимического окисления** как раз и заключается **в упорядочении электронных переходов.** Для этого прежде всего необходимо разделить частицы топлива и окислителя. Топливо и окислитель подводятся к электродам, на которых возможны электрохимические реакции выделения и присоединения электронов. Рассмотрим в качестве примера простейшую электрохимическую реакцию окисления водорода кислородом. Водород подводится к электроду, выбранному так, чтобы на нем могла протекать реакция окисления водорода с образованием водородных ионов и электронов:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e.$$

Другой электрод выбирается таким образом, чтобы на нем подаваемый кислород мог восстановиться в воду:

$$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e \rightarrow H_2O.$$

Если соединить электроды металлическим проводником (электрической цепью), то реакции на обоих электродах все время будут протекать слева направо. Образующиеся на первом электроде электроны по внешней цепи переходят на второй электрод — по цепи течет электрический ток, совершающий электрическую работу. Электрическая цепь замыкается электролитом, в котором образующиеся ионы водорода также переносятся ко второму электроду.

Необходимая для электрической работы энергия получается за счет энергии химического процесса. Суммарной химической реакцией, протекающей на обоих электродах, является реакция образования воды:

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O.$$

Сложность создания топливных элементов заключается в подборе электродов (и электролита), которые были бы достаточно **активны.** Для увеличения скорости электрохимических реакций, как и для реакций химических, часто используют к а т а л и з а т о р ы. Катализаторы находятся на поверхности или в порах электродов; чтобы они не теряли свою активность и служили как можно дольше, химики подвергают их специальной обработке.

## ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

На цветной таблице (стр. 412) представлена схема простейшего водородно-кислородного элемента. Основа элемента — два электрода, на которых происходят электрохимические реакции ионизации газов. Электроды имеют вид тонких пористых дисков, получаемых прессованием и спеканием металлических порошков, чаще всего никелевого порошка. В электрод (либо в процессе изготовления, либо потом) введен катализатор. Электроды укрепляют в ячейке так, чтобы с одной стороны они соприкасались с раствором электролита. Края электродов тщательно герметизированы.

Через обратную сторону к электродам подаются газы: к одному — водород, к другому — кислород. Газы нагнетают под слегка повышенным давлением, так что они частично вытесняют электролит из пор электродов. Таким образом внутри пористого электрода создаются участки контакта трех тел — твердого электрода, жидкого электролита и газообразного реагента (водорода или кислорода). Вблизи этих так называемых трехфазных границ раздела и происходит токообразующая электрохимическая реакция. От электродов ток с помощью специальных токоотводов отводится во внешнюю цепь.

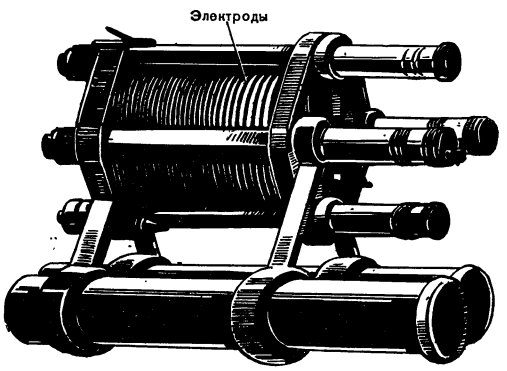
В качестве электролита в водородно-кислородных элементах обычно применяют сорокапроцентный раствор щелочи КОН. Рабочая температура поддерживается равной 70—100°Ц.

Если внешняя цепь разомкнута, то электроны, естественно, не могут перейти с одного электрода на другой: после выделения некоторого количества электронов на водородном электроде и поглощения некоторого количества электронов на кислородном процесс прекращается. Между электродами устанавливается разность потенциалов, называемая электродвижущей силой (э. д. с.) или напряжением разомкнутого элемента. Для водородно-кислородных элементов напряжение при разомкнутой цепи равно 1,0—1,1 *в*, причем более отрицательным является водородный электрод (на нем электроны выделяются и частично накапливаются).

Замкнем внешнюю цепь, подключив к ней, например, лампочку. Через цепь пойдет ток. Возобновившиеся реакции ионизации газов поддержат его. Но во время прохождения тока напряжение элемента несколько снизится; чем больше будет ток, тем ниже напряжение. Практически допускают снижение напряжения до 0,7 *в*. Ток, при котором это напряжение достигается, считается **максимальным разрядным током данного элемента.**

Величина максимального разрядного тока элемента зависит прежде всего от величины поверхности электродов и от их каталитической

активности. Для сравнения элементов разных размеров очень удобно рассчитать величину плотности электрического тока, т. е. тока, снимаемого с единицы поверхности электродов. Для водородно-кислородных элементов в зависимости от катализаторов и условий работы максимальная плотность тока может колебаться от 50 до 500 (и более) миллиампер на квадратный сантиметр поверхности электрода. Таким образом, при использовании электродов с поверхностью в несколько квадрат-




**Батарея водородно-кислородных элементов. Мощность ее 5 *квт*. Диаметр каждого электрода 250 *мм*.**

ных дециметров можно получить разрядные токи в 30—100 *а*.

Для практического использования электрической энергии требуется, как правило, сравнительно высокое напряжение. Автомобильная аппаратура работает при напряжении в 12 *в*, самолетная — в 28 *в*. Чтобы получить такие напряжения, несколько элементов соединяют последовательно в батарею. На рисунке показан общий вид батареи, состоящей из 40 последовательно включенных элементов. Она может дать разрядный ток до 200 *а* при напряжении 28 *в*. Общая электрическая мощность, развиваемая батареей, превышает, таким образом, 5 *квт*.

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Электрохимическое окисление топлива не всегда протекает гладко. Такие распространенные и дешевые виды топлива, как генераторный CO или природный газ $CH_4$, реагируют на электродах значительно хуже, чем водород. Даже самые активные катализаторы лишь в незначительной степени ускоряют эти реакции. А малая скорость реакции означает малую величину плотности тока и, следовательно, малую мощность.

Возможность для проведения этих реакций с достаточной скоростью дает использование высоких температур, например 500° или даже 1000° Ц. Но тут возникает новая трудность: при высоких температурах вода испаряется мгновенно, водный раствор электролита оказывается неподходящим.

Электролитами могут служить либо расплавы солей (например, смесь углекислых солей натрия, калия и лития, плавящаяся при температуре чуть ниже 500° Ц), либо твердые электролиты.

Таким твердым электролитом может быть, например, двуокись циркония $ZrO_2$, содержащая некоторые примеси. При температурах около 800—1000° Ц благодаря подвижности отрицательных ионов кислорода $O^{-2}$ она начинает хорошо проводить электрический ток (катионы $Zr^{+4}$ не перемещаются и ток не переносят). Наличие такой «кислородной» проводимости влияет на характер электрохимических реакций, протекающих на электродах. Если построить элемент описанного выше типа — вместо раствора KOH взять в качестве электролита $ZrO_2$—и подводить к одному электроду окись углерода, а ко второму кислород, то при температурах около 1000° Ц молекулы кислородного электрода станут принимать электроны из внешней цепи, превращаясь в отрицательные ионы:

$$O_2 + 4e \rightarrow 2O^{-2},$$

а молекулы CO топливного электрода соединяются с ионами $O^{-2}$ из твердого электролита, образуя углекислый газ и отдавая электроны во внешнюю цепь:

$$2CO + 2O^{-2} \rightarrow 2CO_2 + 4e.$$

Электрический ток во внешней цепи обусловлен переходом электронов от отрицательного (топливного) электрода к положительному (кислородному) электроду; этот ток компенсируется движением ионов $O^{-2}$ в твердом электролите в обратном направлении.

Такие высокотемпературные топливные элементы, питаемые генераторным газом и кислородом, могут работать при плотностях тока 50—150 *ма/см*$^2$, выдавая напряжение около 0,5 *в* на элемент.

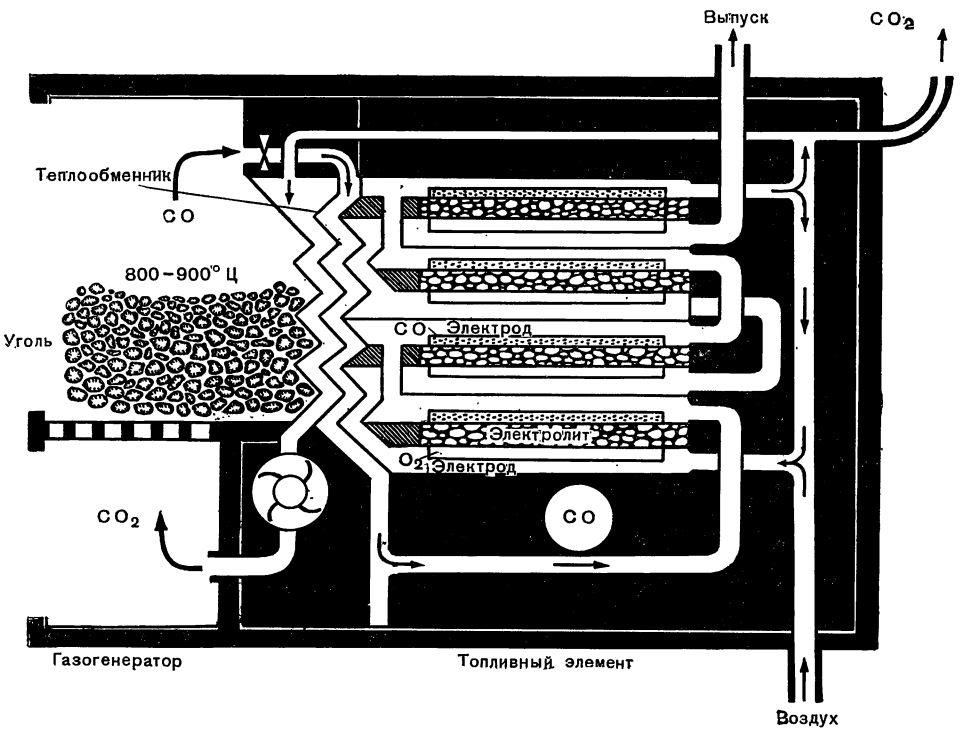
## ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДАЮТ ТОК

Топливные элементы выходят из лабораторий, но предстоит большая работа по их усовершенствованию, повышению их стабильности и упрощению технологии их изготовления. Но уже можно сказать, что вопрос непосредственного преобразования химической энергии топлива в электрическую принципиально решен, и в недалеком будущем различные типы топливных элементов найдут широкое применение в народном хозяйстве.

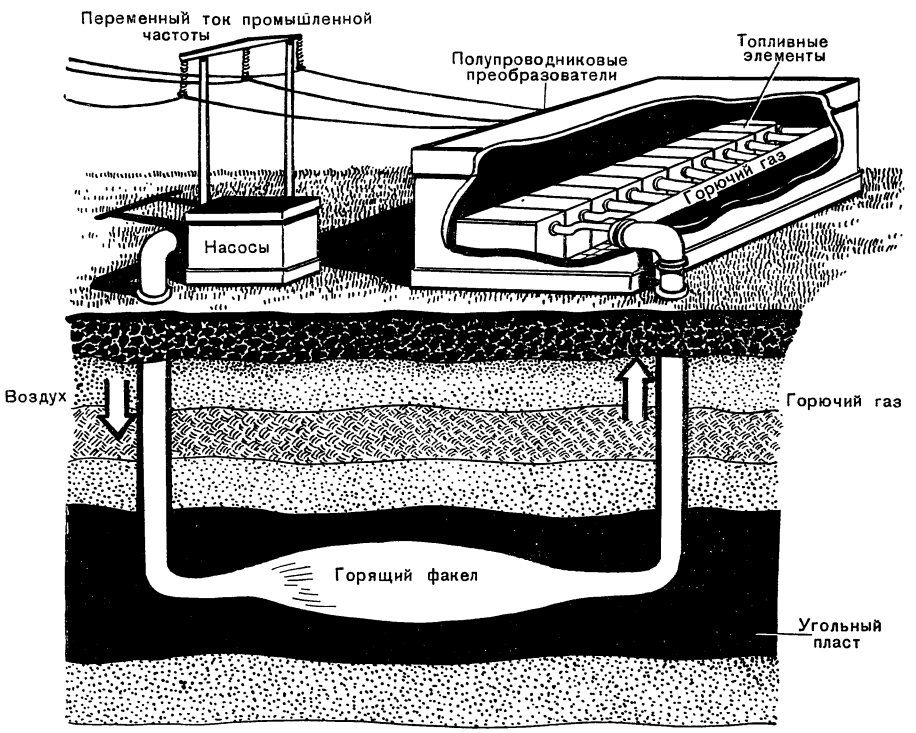
Конечно, заманчивее всего было бы создать на базе топливных элементов большие электростанции, вырабатывающие электрическую энергию из природного топлива или продуктов его переработки. Основой таких электростанций явятся высокотемпературные топливные элементы с расплавленным или твердым электролитом. Топливом для элементов послужит либо природный газ, либо генераторный газ, получающийся при газификации твердого топлива. Твердое топливо при температуре около 700°Ц обрабатывают углекислым газом, в результате чего образуется окись углерода. Окись углерода поступит в топливный элемент, где окислится в углекислый газ:

$$2\,CO + O_2 \rightarrow 2CO_2.$$

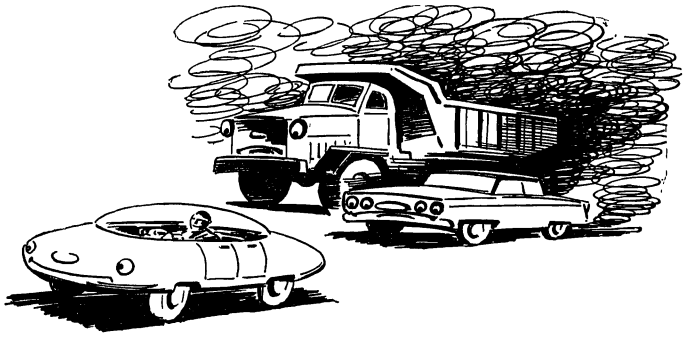
Электростанция будет состоять из большого количества совершенно одинаковых элементов, что значительно упростит ее строительство. На станции почти совсем не будет движущихся и вращающихся механизмов. Постоянный ток, вырабатываемый топливными элементами, по-




**Топливо для работы высокотемпературного топливного элемента вырабатывается в газогенераторе.**




**Электростанция будущего работает на продуктах подземной газификации.**



**Автомобили с электрическими двигателями, питаемыми от топливных элементов, не будут отравлять воздух городов вредными выхлопными газами.**

ступит к мощным полупроводникам преобразователя, вырабатывающим почти без потерь переменный ток промышленной частоты.

Трудно сказать, сколько потребуется времени для осуществления этого, но несомненно, что когда-нибудь невыгодный процесс химического сжигания топлива будет заменен электрохимическим «холодным горением».

Топливные элементы найдут применение также в малой энергетике, и при этом раньше, чем в большой. В сельских районах перестанут стучать многочисленные «дизели», уступив свое место бесшумным электрохимическим установкам.

Очень интересна перспектива применения топливных элементов в автомобилях. Автомобили с электрическими двигателями, питаемыми от топливных элементов, не будут отравлять воздух городов вредными выхлопными газами.

Создание различных топливных элементов электрохимия считает одной из своих важнейших задач. Ее успешное решение способно преобразить многие отрасли техники.

■

# ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ МЕЖДУ ТЕЛАМИ

## МОЛЕКУЛЫ-ПОГРАНИЧНИКИ

Свойства всех веществ зависят от состава и строения их молекул. Свойства тел, для которых вещество служит как бы сырьем, кроме того, зависят и от **расположения молекул,** от **расстояний** между ними, а следовательно, и от их взаимодействия — **молекулярного сцепления.** В одних телах молекулы находятся друг от друга далеко, а в других — совсем рядом, и мы различаем в одном случае газы, а в другом — жидкости и твердые тела — кристаллы.

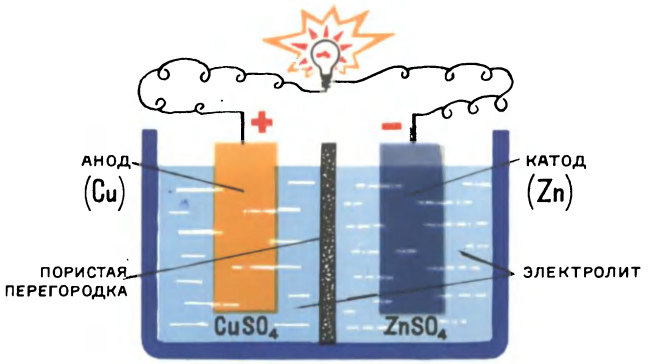
Во всех телах молекулы находятся в беспорядочном тепловом движении, которое замирает лишь при температуре абсолютного нуля — на 273 °Ц ниже точки плавления льда. В газах (парàх) молекулы беспорядочно движутся по прямым, сталкиваясь друг с другом или со стенками сосуда, в жидкостях — ползают, как пчелы в рое, а в кристаллах — беспорядочно колеблются вокруг узлов решетки — правильной пространственной сетки, лишь иногда перемещаясь на короткие расстояния.

Тепловое движение приводит к диффузии, к выравниванию концентрации частичек вещества, т. е. их числа в каждой единице объема тела. Чем выше температура, тем быстрее диффузия. В жидкостях диффузия идет медленнее, чем в газах, а в твердых телах при комнатной температуре она почти незаметна.

Неправильно считать, что молекулы, занимающие весь объем тела, в равной мере определяют его свойства. Особенно важную роль, прежде всего при взаимодействии соприкасающихся тел или тела и окружающей его среды, играют м о л е к у л ы - п о г р а н и ч н и к и. Они занимают поверхности раздела или, вернее, тонкие п о в е р х н о с т н ы е с л о и на границах тел. Молекулы в этих слоях ведут себя иначе, чем в объеме каждого тела.

От особых свойств поверхностных слоев зависят все виды молекулярного взаимодействия тел: прилипание, сваривание, паяние, склеивание, трение. Даже разрушение твердого тела, т. е. преодоление молекулярного сцепления внешними силами, надо рассматривать как образование новых поверхностей — явление, обратное свариванию двух кусков тела. Свойствами поверхностных слоев определяются и такие процессы, как растворение и кристаллизация, испарение и конденсация пара, коррозия, или химическое растворение твердых тел (металлов) окружающей средой, разрушение горных пород и почв — их эрозия.

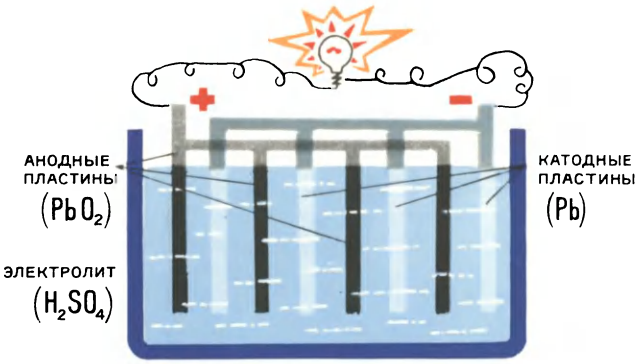
## ГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ




$$Zn + CuSO_4 = ZnSO_4 + Cu$$

I

## АККУМУЛЯТОР

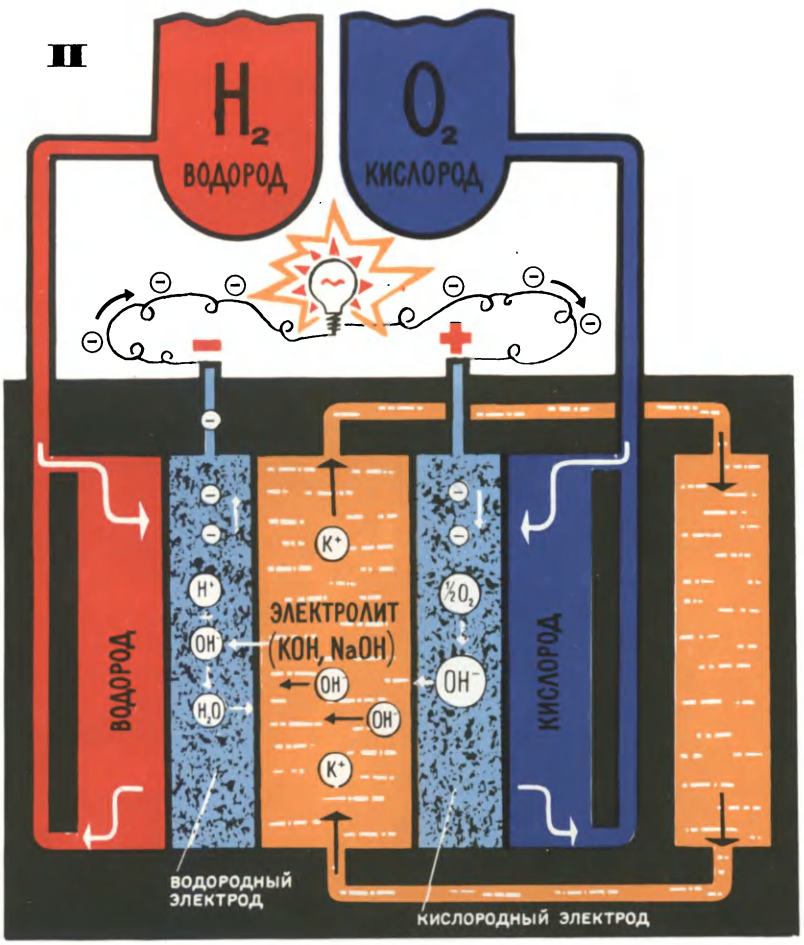



$$PbSO_4 + PbSO_4 + 2H_2O \underset{\text{РАЗРЯД}}{\overset{\text{ЗАРЯД}}{\rightleftarrows}} PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4$$

(анод, катод, анод, катод)

## ТОПЛИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

II




$$2H_2 + O_2 = 2H_2O$$

III

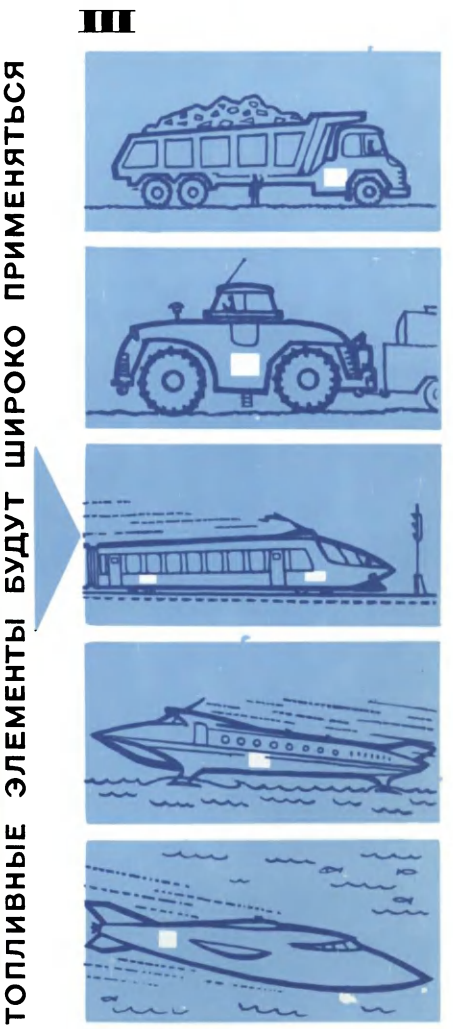
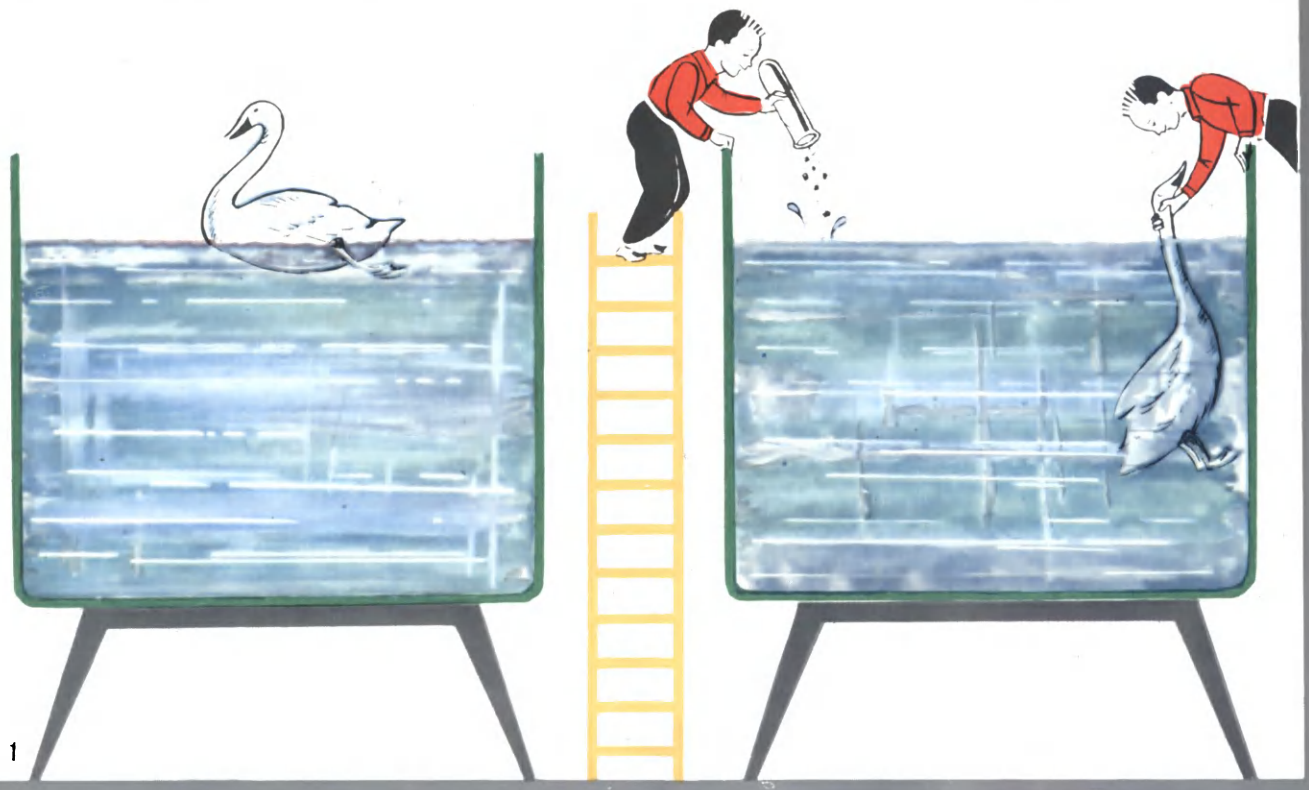



*Таблица к статье „Большая задача электрохимии (топливные элементы)“*

Электрохимические источники тока и топливный элемент: I — схема работы гальванических элементов и аккумуляторов; II — схема работы водородно-кислородного топливного элемента; III — топливные элементы будут широко применяться на транспорте будущего.



1

2

Если твердое тело размолоть в мельчайшие пылинки, поверхность каждой единицы его объема увеличится в десятки тысяч раз. При этом возрастет и химическая активность. Свойства таких дисперсных тел станут целиком определяться свойствами их поверхностного слоя.

Каждая молекула в объеме любого тела связана со своими соседями, равномерно окружающими ее со всех сторон. Иное дело молекулы-пограничники: со стороны объема жидкости или твердого тела у них такие же соседи, так же плотно расположенные, а извне либо их очень мало, если тело граничит с газом (собственным паром), либо это чужие молекулы, принадлежащие другому телу. Поэтому молекулы-пограничники всегда обладают свободными связями — избытком свободной энергии, они активированы — вооружены избытком энергии.

## ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭНЕРГИЯ

Попробуем увеличить поверхность тела, сохранив его объем. Растянем, например, пленку жидкости. Упругое растяжение, как у резины, не произойдет, расстояние между молекулами не увеличится. Просто все новые и новые молекулы будут переходить из объема жидкости на ее поверхность, образуя поверхностный слой толщиной в молекулу — м о н о м о л е к у л я р н ы й  с л о й.

Представим себе молекулы плотно упакованными в поверхностном слое в виде одинаковых кубиков. Размер молекулы, т. е. ребро кубика ($b$), составляет около 3—5 ангстрем (Å). $1\text{Å}=10^{-8}$ *см*. Следовательно, площадь, занятая молекулой ($b^2$), равна 10—25 Å$^2$, а число молекул на 1 *см*$^2$ слоя ($n_1=\frac{1}{b^2}$) — около $10^{15}$.

На каждую молекулу слоя действует сила $f$, направленная внутрь жидкости, и, чтобы вывести молекулу на поверхность, надо затратить работу, приблизительно равную произведению силы $f$ на путь $b$. Работа образования 1 *см*$^2$ поверхностного слоя, или п о в е р х н о с т н о е  н а т я ж е н и е, выразится так:

$$\sigma = f\ b\ n_1 = \frac{f}{b}\ . \qquad (1)$$

Эта величина определяет избыток с в о б о д н о й  э н е р г и и, сосредоточенной в каждом квадратном сантиметре слоя на границе двух любых тел. Эта энергия называется свободной, потому что ее можно использовать для совершения механической работы; подобную же энергию приобретает груз, поднятый на определенную высоту.

Так активируются молекулы-пограничники. Поверхностное натяжение иначе можно назвать удельной свободной поверхностной энергией. Его можно рассматривать как энергию активации всех $n_1$ молекул в 1 *см*$^2$ слоя. На одну молекулу эта энергия составляет $\frac{\sigma}{n_1}=f\,b=\sigma b^2$. Если поверхность тела $S$ *см*$^2$, то свободная поверхностная энергия равна $\sigma S$. У дисперсных тел с очень сильно развитой поверхностью эта энергия может быть очень велика.

Сравним измеренные значения $\sigma$ в *эрг/см*$^2$ при 20° Ц на поверхностях раздела некоторых жидкостей с собственным паром. У углеводорода гептана $C_7H_{16}$ $\sigma=20$, у воды $\sigma=73$, у ртути $\sigma=480$. Для большинства металлов $\sigma$ вблизи точки плавления лежит между 500 и 2000 *эрг/см*$^2$. У малолетучих тел поверхностное натяжение на границе с воздухом характеризует молекулярные силы сцепления. Из уравнения (1) $f=\sigma b$, считая $\sigma=500$ *эрг/см*$^2$, а $b=4\cdot10^{-8}$ *см*, находим $f=2\cdot10^{-5}$ *дин*. Эта сила очень мала — она соответствует весу двух стотысячных долей миллиграмма! Но помножьте ее на все $n_1$ молекул, и вы получите идеальную, т. е. наибольшую, прочность твердого тела на разрыв:

$$P_m = f\ n_1 = \frac{f}{b^2} \approx 10^{10}\ \textit{дин/см}^2.$$

Стержень из такого материала сечением 1 *см*$^2$ выдержит вес 10 *т*!

## КАПЛИ НА ПОВЕРХНОСТИ. СМАЧИВАНИЕ. ФОРМА ЖИДКИХ ТЕЛ

Если каплю жидкости поместить на гладкую сухую поверхность, например на стеклянную пластинку, то она либо полностью растечется, покрыв пластинку пленкой, либо останется на месте. В первом случае произойдет полное с м а ч и в а н и е: силы сцепления жидкости с твердым телом на их общей границе, т. е. силы прилипания, превысят сцепление молекул самой жидкости; во втором — силы

*Таблица к статье «Замечательные явления на границе между телами»*

***1.*** **В аквариуме плавает гусь. Гидрофобная оболочка перьев не смачивается, и вода не проникает в оперение, образуется воздушная подушка, на которой птица плавает, лишь немного погрузившись в воду. Добавим в аквариум немного активного смачивателя, совершенно безвредного для птицы. Гусь почувствовал себя необычно — его оперение намокает, он отяжелел, он тонет!**

***2.*** **Схема флотационной машины.** ***Справа*** **показан пузырек воздуха, выносящий прилипшие к нему частицы ценного минерала.**

прилипания окажутся меньше сил сцепления молекул жидкости и капля не растечется в пленку, полного смачивания не будет. Капля останется сидеть на пластинке, образуя с ней краевой угол; чем он больше, тем хуже смачивание. Если краевой угол тупой, как например у ртути на стекле или у воды на парафине, капля свободно бегает по пластинке, не оставляя на ней следа. Поверхность, образующую тупой краевой угол с каплей воды, называют г и д р о ф о б н о й (в переводе с греческого — ненавидящий воду) или водоотталкивающей. Строго говоря, это неправильно, так как сама вода не отталкивается, а притягивается к любым поверхностям, но силы прилипания к гидрофобным поверхностям так малы, что не могут преодолеть силы сцепления между молекулами воды в капле.

Чем больше поверхностное натяжение жидкости на границе с ее паром, тем хуже она смачивает твердую поверхность. Углеводородные жидкости — нефть и минеральные масла — с $\sigma = 20-30$ смачивают все сухие твердые поверхности, вода ($\sigma = 73$) не смачивает жирные (гидрофобные) поверхности, а ртуть ($\sigma = 480$) не смачивает все обычные поверхности.

Чем сильнее молекулярное взаимодействие жидкости с каким-либо телом, чем она сильнее прилипает к нему, тем лучше она его и смачивает. Оттого-то ртуть и другие жидкие (расплавленные) металлы прекрасно смачивают металл, очищенный от окисла, но не смачивают ни стекло, ни поверхность твердых металлов, покрытую на воздухе окисленной пленкой. Этим свойством широко пользуются при паянии и лужении; перед тем как сварить или спаять металлы, их очищают от окислов. В отличие от гидрофобных г и д р о ф и л ь н ы е поверхности (по-гречески — любящие воду) хорошо смачиваются водой. С поверхностями кварца и силикатных стекол вода вступает даже в химическое соединение, образуя слои гидрата двуокиси кремния — кремневой кислоты.

Сами по себе, или, как говорят, самопроизвольно, происходят те процессы, при которых уменьшается свободная энергия. Именно поэтому самопроизвольно, под действием молекулярных сил, капля жидкости принимает форму шара: поверхность ее становится наименьшей при постоянном объеме. Это легко заметить, наблюдая за маленькими каплями воды на несмачиваемой поверхности парафина или за каплями ртути на стекле. У крупных капель форма шара искажается силой тяжести, но если большую каплю масла поместить в не смешивающуюся с ним жидкость равной плотности, например в смесь воды со спиртом, она по закону Архимеда станет невесомой, тогда капля примет форму шара (рис. 1). Это и есть собственная форма жидких тел; она легко возникает, но так же легко искажается под действием внешних сил.

Соприкасаясь, капельки сливаются в одну большую каплю, что тоже вызвано уменьшением свободной поверхностной энергии — уменьшением поверхности при постоянстве объема. Число молекул-пограничников при этом всегда уменьшается; они возвращаются в объем жидкости.

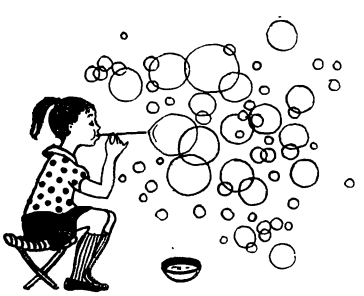
## АДСОРБЦИЯ

Поверхностный слой может улавливать из окружающей среды такие молекулы, которые способны «насытить» свободные силы сцепления молекул-пограничников. Эти силы связывают молекулы слоя с уловленными молекулами. При этом поверхностная энергия уменьшается без изменения поверхности. Такой процесс называется а д с о р б ц и е й, а вещества, молекулы которых связываются с поверхностью,— п о в е р х н о с т н о - а к т и в н ы м и в е щ е с т в а м и.

Адсорбцию используют для очистки газов и жидкостей от примесей и вредных веществ, для извлечения из растворов ценных продук-

### Как выдувать мыльные пузыри?

Растворите в 100 *г* теплой дистиллированной или долго кипевшей воды 2 *г* тонко наструганного сухого детского мыла и 10 *г* чистого глицерина. После охлаждения к раствору добавьте понемногу крепкого нашатырного спирта, пока раствор не станет прозрачным и не будет сильно пахнуть аммиаком. Затем небольшую стеклянную вороночку, к которой присоединена резиновая трубочка, погрузите раструбом в мыльный раствор. Крупные пузыри хорошо выдувать на блюдце с раствором, смочив им края блюдца. Выдувая пузырь, понаблюдайте, как с уменьшением толщины пленки на ней играют все более и более яркие интерференционные цвета.



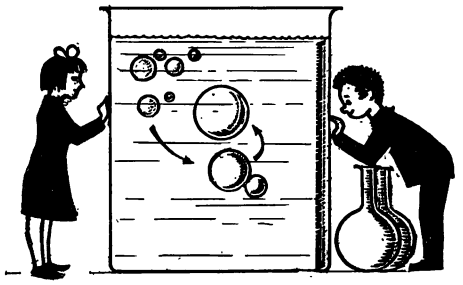


**Рис. 1. Если большую каплю масла поместить в не смешивающуюся с ним жидкость равной плотности, например смесь воды со спиртом, то по закону Архимеда капля масла станет невесомой. Такая капля принимает форму шара. Отдельные капельки масла сливаются в одну большую.**

тов, например соединений редких металлов. Вещества улавливаются на поверхности адсорбентов — тонкопористых тел, пронизанных мельчайшими открытыми каналами. Таковы специально приготовленные активные угли, или силикагели; их получают обезвоживанием студней кремнекислоты. Поверхность одного грамма таких высокодисперсных адсорбентов достигает 1000 $м^2$! Адсорбенты применяют и как катализаторы — ускорители химических реакций. Молекулы веществ, активируясь на поверхности в порах адсорбента, легче реагируют друг с другом, и скорость реакции повышается во много раз. Именно так действуют катализаторы при получении аммиака, серной кислоты и в других важнейших химических производствах.

Главная роль поверхностно-активных веществ в том, что они сильнейшим образом изменяют свойства поверхности тел и условия взаимодействия этих тел. Для этого требуется очень мало поверхностно-активного вещества — столько, чтобы покрыть поверхность адсорбента слоем в одну молекулу. При самой плотной упаковке молекула этого слоя занимает площадку в виде квадратика со стороной около 4,5Å. Следовательно, площадь, занимаемая молекулой, равна $(4{,}5 \cdot 10^{-8})^2 = 20 \cdot 10^{-16} см^2$. Значит, на 1 $м^2$ приходится $\frac{10^4}{20 \cdot 10^{-16}}$ молекул. Но известно, что грамм-молекула (моль) любого вещества содержит $6 \cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро); таким образом, на 1 $м^2$ приходится около $10^{-5}$ моля вещества. Если молекулярный вес этого вещества около 300, то, чтобы покрыть 1 $м^2$ поверхности мономолекулярным слоем, потребуется около 3 *мг* поверхностно-активного вещества.

Свойства адсорбционных слоев помогают нам управлять технологическими процессами: отмывать загрязнения с любых материалов, приготовлять устойчивые суспензии и эмульсии или, наоборот, быстро их разрушать, делать поверхности смачиваемыми или, наоборот, не смачиваемыми водой. Поверхностно-активные вещества позволили разработать ф л о т а ц и ю — эффективный метод обогащения полезных ископаемых, т. е. отделения их частиц от пустой породы. Частицы ценного минерала, сделавшись благодаря тончайшему адсорбционному слою несмачиваемыми, при перемешивании в воде прилипают к пузырькам воздуха и выносятся ими наверх, в пену, а хорошо смачиваемые частицы породы остаются в воде и оседают на дно. Флотационные процессы помогают добывать свинец, цинк, медь, золото, платину и все редкие и ценные металлы, обогащать фосфориты, серу, уголь, железную руду, использовать самые бедные руды, которые прежде невыгодно было разрабатывать. Во всем мире на огромных флотационных фабриках обогащаются ежегодно миллионы тонн рудных и нерудных ископаемых.

С помощью поверхностно-активных веществ можно делать несмачиваемыми ткани и волокна. Они остаются пористыми, пропускают пары, «дышат», но не впитывают и не пропускают воду.

## КАК ПОСТРОЕНЫ МОЛЕКУЛЫ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Молекулы поверхностно-активных веществ состоят из двух частей, связанных химическими силами, но с противоположными свойствами: из гидрофильной полярной группы (гидроксильной, карбоксильной или аминогруппы) и гидрофобной длинной неполярной углеводородной цепи. Полярная группа — источник сил притяжения. Углеводородная же цепь слабо притягивает другие молекулы. Недаром предельные углеводороды назвали парафинами (в переводе с латинского — слабое сродство). Молекулы притягиваются своими полярными группами к твердым поверхностям, а углеводородные цепи этих молекул торчат наружу, покрывая их поверхность гидрофобной пленкой (рис. 2).

Растворите в воде капельку поверхностно-активного вещества — спирта или жирной кислоты. На воде образуется молекулярный адсорбционный слой. Гидрофильные полярные группы останутся в воде, углеводородные же цепи из-за сильного притяжения молекул воды друг

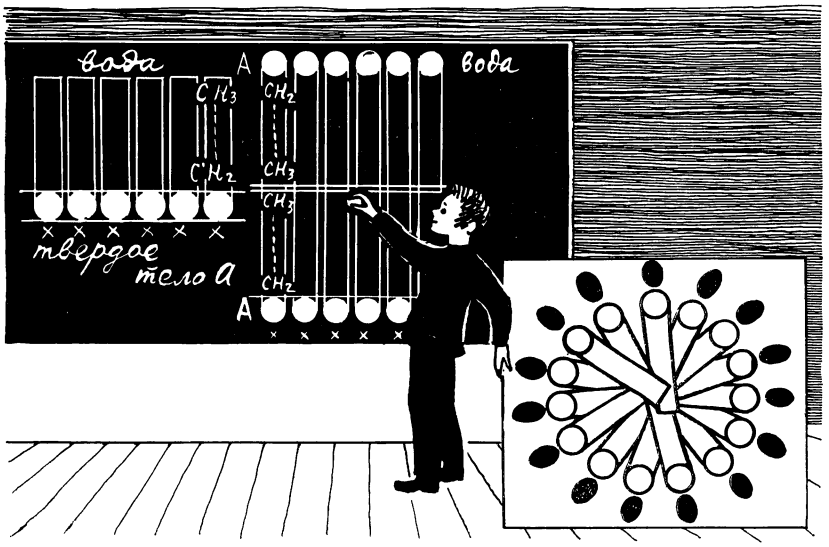
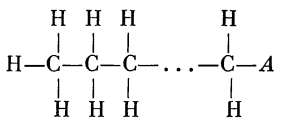


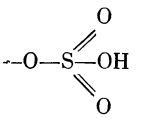

**Рис. 2. Ориентация молекул поверхностно-активного вещества при адсорбции на твердом теле *слева на доске*. Строение мицелл мыла: шарообразных — *справа внизу*, пластинчатых — *справа на доске*. Белыми кружками показаны полярные группы, черными—молекулы воды, крестиками— атомы поверхности твердого тела.**

к другу будут выталкиваться ими на поверхность. Чем длиннее углеводородная цепь, тем активнее адсорбируется вещество, тем сильнее оно понижает поверхностное натяжение воды — у чистой воды с 73 *эрг/см*$^2$ до 27 *эрг/см*$^2$; оно приближается к поверхностному натяжению чистого углеводорода — 20 *эрг/см*$^2$.

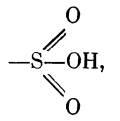
Самыми эффективными и универсальными поверхностно-активными веществами оказываются моющие (мылообразные) вещества. Углеводородная цепь их молекул состоит не менее чем из 11 звеньев



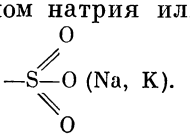
и «уравновешена» сильно гидрофильной полярной группой *A*, которая сама по себе резко повышает растворимость вещества в воде. Такой группой может быть остаток серной кислоты



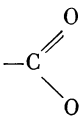
или сульфогруппа



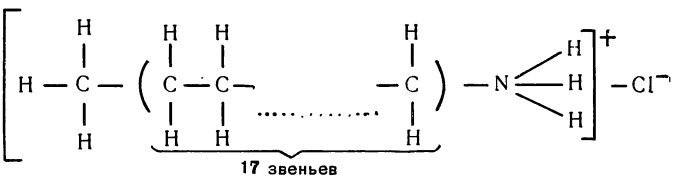
в которых ион водорода может замещаться ионом натрия или калия:



На месте группы *A* может встать карбоксильная группа жирных кислот:

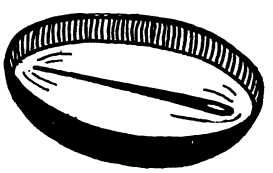


где водород замещен щелочным металлом (Na, K). Щелочные соли высших жирных кислот и называются собственно мылами. Мылообразные вещества растворимы в воде и обладают высокой поверхностной активностью. Образуя адсорбционные слои, они сильно понижают поверхностное натяжение воды. Вещества эти анионактивны, так как углеводородная цепь — источник поверхностной активности — входит у них в состав отрицательного иона— **аниона,** а положительным ионом (**катионом**) служит ион водорода или щелочного металла. В катионактивных веществах углеводородная цепь входит в состав поверхностно-активного катиона, а анионом служит, например, ион хлора. Такова хлористоводородная соль октадециамина




## Может ли сталь плавать на воде?

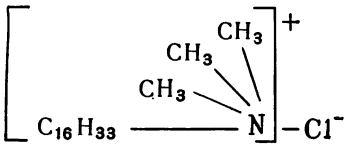
**Закон Архимеда дает ясный ответ: сталь тяжелее равного объема воды почти в 8 раз — она обязательно должна утонуть, упасть на дно. Однако потрем сухую иглу между пальцами и осторожно положим ее на поверхность чистой воды в тарелке. Класть надо горизонтально. Для этого можно положить иголку сначала на кусочек**



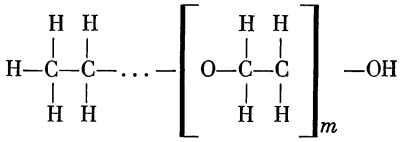
**промокашки, а затем на воду. Бумажка промокнет и потонет, а игла будет плавать. Ее удерживает поверхностное натяжение воды.**

**Если подлить в воду концентрированный раствор смачивателя, понижающего поверхностное натяжение воды,— мыла, игла вскоре намокнет и потонет.**

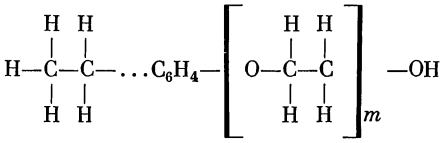
или хлористая соль четырехзамещенного (триметил-, гексадецил-) аммония:



Поверхностно-активные вещества могут быть и неионными, тогда они растворяются в воде в виде молекул. Чтобы они были подобны мылу, их полярная группа должна обладать высокой гидрофильностью. К таким веществам принадлежат моноалкиловые или алкифенольные эфиры полиэтиленгликоля. Гидрофильная группа у них — полимеризованная окись этилена $(C_2H_4O)_m$, где $m$ изменяется от 4 до 20.



или



## ПОЧЕМУ МЫЛА МОЮТ

Мылообразные поверхностно-активные вещества образуют в воде коллоидные растворы: при определенной концентрации несколько десятков молекул или ионов мыла объединяются в агрегаты — мицеллы (рис. 2). Мицеллы имеют шарообразную форму с гидрофильной оболочкой из полярных групп и гидрофобным ядром из углеводородных цепей. С ростом концентрации мицеллы становятся пластинчатыми — прослойки из углеводородных цепей покрыты с обеих сторон полярными группами. Такие пластинчатые мицеллы становятся зародышами кристалликов мыла. Пластинчатые мицеллы сцепляются углеводородными цепями крайних молекул в пространственные сетки-каркасы, и раствор, как говорят, **структурируется** — приобретает свойства упругого твердого тела, напоминающего желе и называемого г е л е м.

Поверхности, покрытые такими мицеллярными адсорбционными слоями в растворах мыл, всегда хорошо смачиваются водой. Этому помогает сильно пониженное поверхностное натяжение воды на границе с воздухом. Именно поэтому одно и то же вещество может в очень малой концентрации делать твердую поверхность гидрофобной, в большой концентрации давать прямо противоположный результат — обеспечивать смачивание водой любую гидрофобную поверхность (рис. 3).

Но мыла не только смачиватели; они и сильные стабилизаторы, обеспечивающие устойчивость жидких пленок (вспомним знакомые всем мыльные пузыри) — пен, а также всех дисперсных систем — э м у л ь с и й и с у с п е н з и й. В эмульсиях мелкие капельки одной жидкости, не смешиваясь, распределяются в другой жидкости. Под действием поверхностной энергии они при соприкосновении стремятся слиться друг с другом. Подобно этому сцепляются в агрегаты и частицы твердого тела, образующие суспензию в жидкой среде. Стабилизатор же создает на поверхности капелек эмульсии или частиц суспензии гелеобразный (структурированный) адсорбционный слой, который препятствует сближению и взаимодействию частиц.

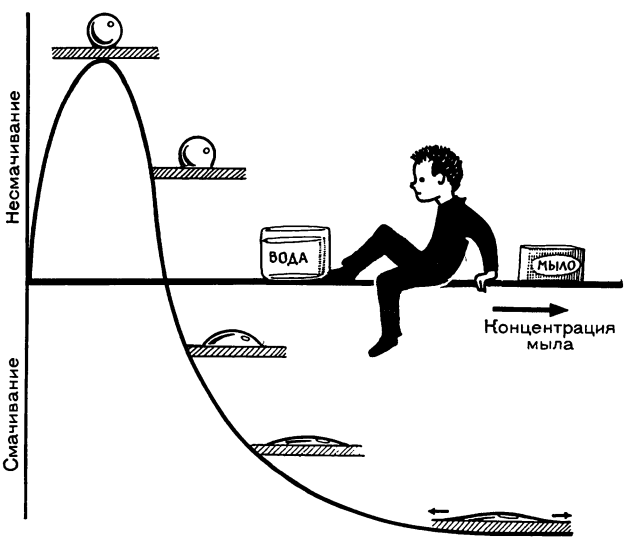



**Рис. 3. Влияние адсорбции мыла на смачивание водой твердых поверхностей.**

Нальем в стеклянный сосуд (бутылку) воду и, встряхивая, будем понемногу добавлять туда керосин или бензин. Капельки бензина тотчас же начнут сливаться в крупные капли, и смесь разделится на два жидких слоя. Теперь повторим опыт, добавив к воде 1—5% мыла. При встряхивании образуется молочно-белая

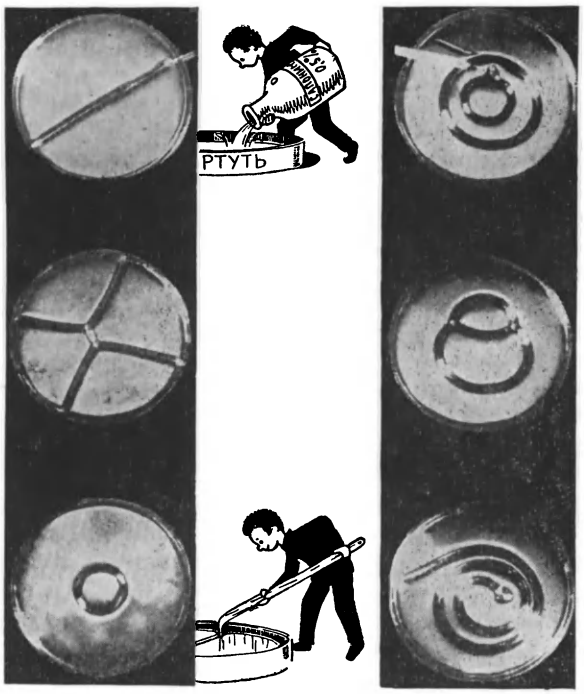



Рис. 4.

устойчивая эмульсия, в которой отдельные капельки, не превышающие сотых долей миллиметра, защищены от слияния адсорбционными оболочками мыла.

Водный раствор мыла занимает двадцатую часть сосуда, но его хватает на эмульгирование в двадцать раз большего объема бензина. Весь бензин разобьется на мельчайшие капельки, плотно прижатые друг к другу, но устойчиво разделенные тонкими прослойками мыльного раствора. Такие концентрированные эмульсии очень вязки, они напоминают сметану. Кстати, и сметана, и сливки, и молоко — это эмульсии жира в воде, стабилизованные белковым веществом — альбумином.

Попробуем разрезать кончиком стеклянной палочки слой ртути толщиной 2—3 *мм*, покрывающий дно плоской чашечки или блюдца под водой (рис. 4). Такой разрез сделать нельзя: он тотчас же «залечивается» — смыкается под действием поверхностного натяжения на границе ртуть—вода. Однако, если к воде добавить один процент сапонина — экстракта из мыльного корня, разрез стабилизируется структурированными адсорбционными слоями. Они примут форму, соответствующую минимуму свободной энергии, которую можно рассчитать математически. Разрез должен кончаться у краев слоя ртути или замыкаться на себя, образуя кружок — кольцо. В одной точке могут пересекаться только три разреза, образуя равные углы в 120°.

Время жизни таких разрезов возрастает по мере насыщения адсорбционного слоя и характеризует стабилизирующую способность данного поверхностно-активного вещества.

Так почему же мыло моет, почему оно легко отмывает с любой поверхности грязь — сажу, масло, нефть? Именно потому, что оно обладает смачивающей и стабилизирующей способностью. Мыло переводит всю грязь в воду в виде тонкодисперсных суспензий и эмульсий.

Обычное мыло — натриевые соли жирных кислот — без труда справляется с грязью в мягкой воде, в которой нет солей кальция и магния. В жесткой же воде мыло осаждается в виде нерастворимых кальциевых и магниевых мыл, раствор теряет свою моющую способность. Однако химики создали синтетические мылообразные (моющие) вещества, пригодные для любой воды, даже для морской; особенно хороши неионные мыла, совершенно устойчивые к действию солей.

Моющие средства и смачиватели используются и в быту, и в промышленности, и в сельском хозяйстве. Смачиватели применяют в изготовлении фотокинопленки, когда прозрачную полимерную ленту надо равномерно полить светочувствительным составом высокодисперсной взвесью бромистого серебра на водном растворе желатины. Смачиватель, добавленный в ванну, где окрашивают волокно и ткань, ускоряет процесс и делает окрашивание равномерным. Полное смачивание — необходимое условие для взаимодействия жидкости с твердым телом, для проникновения жидкости в тонкие поры. Поэтому-то все ядохимикаты и гербициды, применяемые в сельском хозяйстве, содержат поверхностно-активные вещества.

Лучше всего действуют такие средства в виде тонкодисперсных эмульсий или суспензий. Поверхностно-активные вещества в них служат и смачивателями и стабилизаторами действующего яда. Порошок ДДТ, например, не смачивается водой, и из него нельзя приготовить раствор для опрыскивания. Но тот же порошок с добавкой смачивателя равномерно распределяется в воде, образуя в ней устойчивую суспензию, прочно прилипающую к поверхности листвы и вредителей.

Смачиватели несут самую разнообразную службу. Например, чтобы избавить шахтеров

от вредной пыли, в шахтах распыляют воду с добавкой смачивателя. Пыль улавливается такой водой, и воздух становится чище.

## ПЕНЫ ПОЛЕЗНЫЕ И ВРЕДНЫЕ

Мылообразные вещества вызывают образование устойчивой обильной пены, в которой пленки разделяют мелкие пузырьки воздуха или другого газа.

Если загорится нефть или бензин, пожар можно потушить только устойчивой пеной. Ее получают, вспенивая водный раствор поверхностно-активного вещества-стабилизатора углекислым газом. Устойчивую пену применяют и в производстве легких и достаточно прочных теплоизоляционных материалов — пенобетонов, пенопластиков, пенорезин. В пленках такой пены отвердевает цемент или образуется полимер, и пена становится твердой. Вспененный материал в сотни раз легче массивного. Если кубометр литого пластика весит 1 *т*, то кубометр того же пенопласта — всего 10 *кг*. Нет нужды доказывать, насколько удобен и полезен такой материал.

Но, кроме полезных пен, есть и вредные. Тем, кто готовит пищевые продукты или лекарства, нередко устойчивая пена очень мешает. Пена может даже затопить цех. Тогда в ход идут пеногасители — вещества, понижающие поверхностное натяжение сильнее, чем вспениватели. Пеногаситель, например октиловый спирт, вытесняет из поверхностного слоя адсорбированный стабилизатор, но сам структурированного слоя образовать не может, и пена разрушается.

На этом основано и химическое деэмульгирование — разрушение устойчивых эмульсий малыми добавками очень активных веществ. Деэмульгаторы, как и пеногасители, хотя и образуют пены и эмульсии, но очень неустойчивые — они «живут» всего несколько минут.

Нефть, добываемая из недр земли, почти всегда содержит воду в виде мелких капелек в устойчиво эмульгированном состоянии. Вода сильно засолена — часто это насыщенный раствор природных солей, так как соляные пласты, «купола», сопровождают нефтяные месторождения. Чтобы не возить и не обрабатывать эту воду и чтобы она не подвергала коррозии ценную аппаратуру для перегонки нефти, эмульсию нужно разрушить. Сто граммов деэмульгатора на тонну нефти — и эмульсия расслаивается, в нефти почти не остается воды.

## ОТ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРОВ ДО КНИГОПЕЧАТАНИЯ

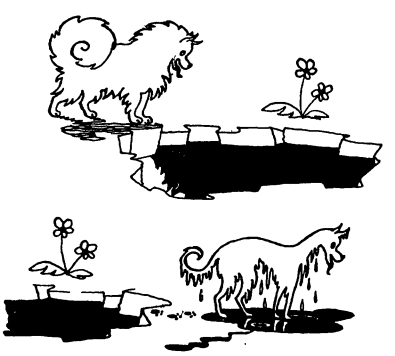
Углеводороды практически нерастворимы в воде, но хорошо растворимы в водном растворе мыла: они поглощаются ядрами мицелл. Это явление называется солюбилизацией или коллоидной растворимостью и играет большую роль в производстве полимеров. Молекулы мономера — первичного вещества, из которого получается полимер,— при эмульгировании в водном растворе мыла переходят из капелек в ядра мицелл, где идет

### Что прочнее — сухой или влажный слой песка?

Сухой песок сыпуч и бессвязен — из него нельзя формовать детские «куличики» пли строить домики. Вспомним, как трудно пешеходу или велосипедисту передвигаться по сухому прибрежному песку. Но стоит немного смочить песок водой, как он становится пластичным, а вылепленные из него сооружения достаточно прочными. По такому песку легко ходить и ездить на велосипеде. Если с помощью рюмки сформовать из влажного песка конус, он осыплется, когда полностью высохнет или в том случае, когда он под водой. Это показывает, что вязкость влажного песка вызвана смачивающими «мостиками»— менисками воды, которые стягивают зерна песка. Эти же мениски стягивают волоски шерсти мокрой собаки. Мостики исчезают и при полном удалении влаги, и при заполнении водой всех пустот между зернами.

Иное дело с глиной. Если замешать ее с водой как густое тесто, а потом высушивать, то, чем меньше в ней останется воды, тем прочнее будет отформованное изделие — в тысячи раз прочнее «кулича» из влажного песка. Частицы глины гораздо меньше, чем зерна песка, и они связаны непосредственно молекулярным сцеплением по относительно большим площадкам прямого соприкосновения. Тонкие прослойки воды только раздвигают частицы глины и понижают прочность структуры.

Прочность грунтов, на которых строят здания, зависит от содержания в них песка и глины. Этой прочностью можно управлять, изменяя условия на поверхностях раздела во влажном грунте.



полимеризация. Образуется латекс — высокодисперсная взвесь частиц полимера, напоминающая сливки (млечный сок по-латыни—«латекс» ). Полимеризация в эмульсиях очень удобна для изготовления пленочных изделий: в латекс макают металлический цилиндр, и, после того как вода испарится, на нем образуется сплошная пленка из слившихся друг с другом частиц полимера.

Поглощая жидкий углеводород, керосин или гептан, пластинчатые мицеллы мыла разбухают, становятся круглыми и больше не могут сцепляться в каркас. Даже концентрированные растворы мыл — гели — при этом разжижаются, превращаясь в текучие жидкости, их вязкость понижается в сотни тысяч раз. Так можно управлять образованием пространственных структур в дисперсных системах,—их превращают в твердые тела или в легко текучие жидкости. С помощью мыл можно загущать, или, как говорят в технике, «отверждать», жидкое горючее— керосин, бензин или спирт. Таким горючим пользуются полярники, геологи, туристы.

Человеческие потребности разнообразны. Нам необходимо научиться отмывать грязь, но не менее важно наносить ее на чистую поверхность. Что такое печатание книг и иллюстраций, как не нанесение на бумагу устойчивых загрязнений. Процесс печатания можно рассматривать как сложный комплекс тонко управляемых поверхностных явлений. В литографии на поверхность гладкого камня — известняка — или металлическую печатную форму наносят жирной краской рисунок. Краска содержит поверхностно-активные вещества (обычно жирные кислоты). Благодаря им одни участки формы смачиваются краской, но не смачиваются водой, а другие после обработки водным раствором гидрофильного поверхностно-активного вещества (крахмала, декстрина, поливинилового спирта) во влажном состоянии не воспринимают краску и становятся «пробельными местами». В этом процессе очень важно сделать резкой границу между двумя такими участками и сохранить ее надолго, чтобы с одной формы получить много оттисков.

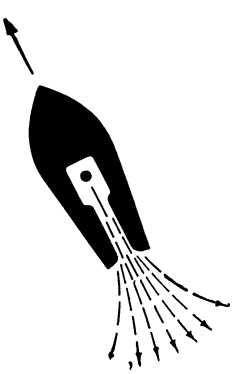
Поверхностно-активные вещества — наши незаметные и незаменимые друзья. Они помогают нам управлять поверхностными процессами, которые имеют решающее значение во взаимодействии различных тел — твердых, жидких и газообразных. Не думайте, что поверхностные явления и процессы характерны только для техники, не менее важны они и в природе. Вот быстро бежит по зеркалу пруда водомерка — ее лапки не смачиваются водой. По той же причине прилипает к поверхности

## Как самому ставить опыты с мономолекулярными слоями

В белую тарелку или стеклянную ванночку, вымытую горячей водой и розовым раствором марганцовокислого калия, наливают чистую воду так, чтобы она переливалась через край. Это обеспечит чистоту поверхности воды, на ней не будет мономолекулярных слоев активных загрязнений. Затем поверхность воды припудривают тальком и касаются ее поверхности стеклянной палочкой, смоченной в олеиновой кислоте. Слой талька раскалывается и уплотняется мономолекулярным слоем олеиновой кислоты. Удача опыта и служит проверкой чистоты поверхности.

Второй опыт. На чистую поверхность воды насыпают немного мелких кристалликов камфары или паратолуидина, которые тотчас же начинают носиться по поверхности в бешеном танце: поверхностно-активные молекулы разбегаются, отрываясь от самых активных мест кристалликов, а те испытывают реактивные толчки в разных направлениях. Такое адсорбционное движение можно сделать и направленным. Из алюминиевой фольги вырезают подобие плоской ракеты — реактивного кораблика с прорезом в хвосте. Кораблик плавает на воде, удерживаясь силами поверхностного натяжения (вследствие несмачивания). Затем пинцетом в прорез осторожно помещается кристаллик поверхностно-активного вещества (камфары). Поток молекул вырывается струйкой из прореза, стремясь покрыть всю поверхность мономолекулярным слоем. Кораблик движется вперед под действием реакции струи и быстро вращается вдоль краев сосуда. И танец кристалликов, и движение кораблика можно тотчас прекратить, коснувшись поверхности воды палочкой, смоченной олеиновой кислотой. Кислота гораздо активнее, и ее мономолекулярный слой равномерно покрывает всю поверхность воды, быстро вытесняя адсорбционные слои камфары или других веществ и понижая еще сильнее поверхностное натяжение

Опыт вытеснения адсорбционного слоя можно сделать еще более эффектным, нанеся на чистую поверхность воды несколько мельчайших крупинок анилинового красителя — кристаллического фиолетового. Поверхностно-активный краситель растворяется прежде всего в поверхностном слое, окрашивая его в фиолетовый цвет. Ничтожные количества олеиновой кислоты, как говорят химики, ее следы, не обнаруживаемые никакими методами, кроме радиохимического, немедленно вытесняют слой красителя. Поверхность становится бесцветной, а окрашенные слои воды уходят в объем.



воды и не тонет личинка малярийного комара. Чтобы избавить окрестность от малярии, надо покрыть пруд тончайшей нефтяной пленкой.

Капли росы и дождя не смачивают восковую поверхность листьев, а потому не закрывают поры, и растения дышат свободно. Силы смачивания помогают влаге подниматься по стеблям и стволам растений. Напротив, благодаря тому что плазма крови не смачивает стенки самых тонких капиллярных сосудов, облегчается кровообращение, кровь не свертывается. Выпадение осадков, образование и рассеивание тумана и облаков — все это поверхностные явления. Мелкие зародышевые капельки и кристаллики влаги испаряются, крупные, наоборот, растут за счет конденсации пара и слияния друг с другом — идет дождь или снег. Все это связано с проявлениями поверхностной энергии.

Но если множество процессов в природе, в организмах растений и животных вызвано особыми свойствами поверхностей, то не научится ли человек управлять ими так же, как сейчас он управляет подобными процессами в технике. На этот вопрос можно дать утвердительный ответ. Физико-химия поверхностных явлений и дисперсных систем — наука быстро развивающаяся, и от нее надо ожидать очень много нового и ценного. Порукой этому служат необозримые применения ее уже в наши дни: от обогащения руд до книгопечатания, от моющих средств до производства полимеров.

## ПУТЬ К ПРОЧНОСТИ — ЧЕРЕЗ РАЗРУШЕНИЕ

Странно звучит, не правда ли? Всем известно, что прочность — это сопротивление твердого тела разрушению. И все-таки, как это ни парадоксально, путь к самой высокой прочности ведет через разрушение твердого тела — через его превращение в мельчайшие крупинки. Чтобы понять это удивительное противоречие, выясним, что такое реальные твердые тела и чем они отличаются от идеальных. В кристаллах расстояния между молекулами, атомами или ионами в среднем очень малы и правильные ряды этих частичек образуют пространственную решетку. Такого порядка в расположении молекул нет в жидкостях, хотя и здесь молекулы расположены очень плотно. Стекла — вязкие жидкости, они практически не текут и могут быть прочными и упругими, как кристаллы, хотя и лишены правильной структуры.

Но беспорядочное тепловое движение молекул образует и в кристаллах, и в стеклах изъяны, или дефекты,— места с меньшей плотностью «упаковки» молекул и с увеличенными расстояниями между ними. Такие дефекты плотной структуры — слабые места с пониженной прочностью. Они-то и есть причина того, что прочность реальных твердых тел в несколько сот раз ниже, чем прочность идеальных кристаллов и стекол. У идеального твердого тела тот же состав и строение, что и в реальном теле, но в его правильной или просто плотной структуре нет слабых мест, изъянов.

Разрушение любого реального твердого тела — процесс постепенного раскрытия сначала наиболее слабых мест, а затем все менее и менее опасных дефектов. Представим себе, что тело образовано сеткой переплетенных стальных цепей, в которых на каждые сто стальных звеньев приходится в среднем по одному бумажному звену. Ясно, что под нагрузкой в такой конструкции будут разрываться бумажные звенья, стальные же останутся нетронутыми. В обрывках сетки будет оставаться все меньше и меньше бумажных звеньев, наконец останутся только стальные. Такие обрывки цепей из стальных звеньев — маленькие осколки твердого тела — будут очень прочны, в них уже почти совсем не встретишь изъянов.

Теперь вам понятен парадокс: измельчение твердого тела — путь к его упрочнению. Легко сообразить, что крупинки твердого тела станут особенно прочными, близкими к идеальной, т. е. наибольшей прочности, когда их размер приближается к среднему расстоянию между дефектами в структуре (рис. 5). Современные методы структурного анализа показывают, что в среднем один дефект — зародыш разрушения — приходится в твердом теле на несколько сот нормальных расстояний между центрами молекул. Это нормальное расстояние равно нескольким ангстремам — десятимиллионным долям миллиметра. Значит, среднее расстояние между дефектами — десятые доли микрона (около $10^{-4}$ *мм*). И действительно, тонкое измельчение твердых тел в обычных мельницах, постепенно замедляясь, прекращается вовсе, когда размеры крупинок достигают микрона или долей микрона. В таких крупинках уже почти нет изъянов, они становятся очень прочными.

Но ведь нам нужны не отдельные, пусть даже сверхпрочные крупинки, а прочное тело большого размера. Устранив бумажные звенья, мы должны теперь соединить обрывки сталь-

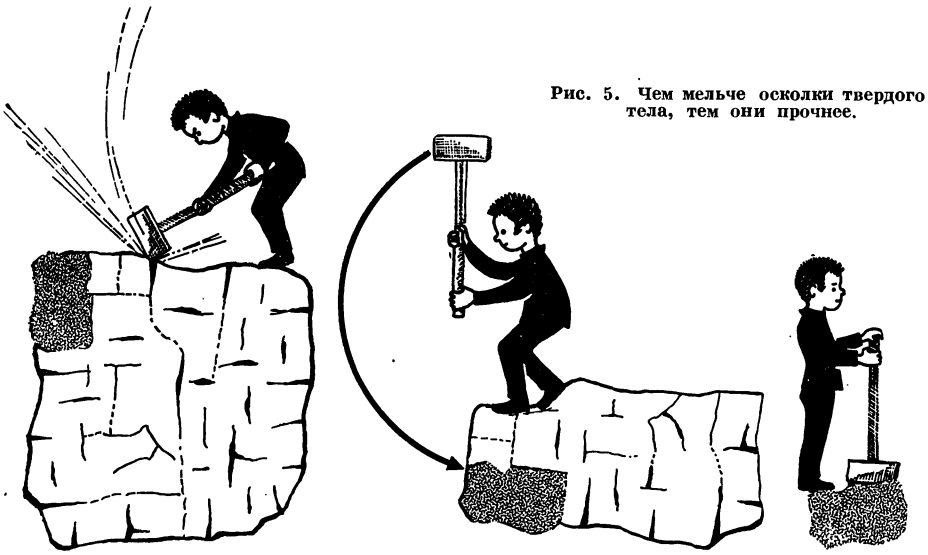


Рис. 5. Чем мельче осколки твердого тела, тем они прочнее.

ных цепей, т. е. склеить или сварить крупинки друг с другом. Это можно сделать, например, связав их тончайшими прослойками другого мелкокристаллического или стекловидного материала. Если эти прослойки будут очень тонкими, они окажутся упрочненными по тем же причинам.

Измельчение путем разрушения — не единственный путь к высокой прочности. Самое главное — получить мелкозернистое (высокодисперсное) твердое тело. А прийти к этому можно и другим путем. В расплавленном металле или в другой жидкости, охлажденной ниже температуры плавления, создают условия для быстрого образования множества зародышей будущего твердого тела. Затвердевая, жидкость превращается в прочный сросток мельчайших беспорядочно расположенных кристалликов. Такие же кристаллики нового твердого тела могут образоваться и в старом теле после термомеханической обработки, в которой сочетаются нагрев, охлаждение и пластическая деформация. Таким же путем можно закристаллизовать и стекла. Так получают ситаллы, в которых мельчайшие кристаллики связаны тонкими прослойками твердого, но незакристаллизовавшегося стекла.

Но возвратимся к разрушению твердого тела, к его превращению в мельчайшие крупинки. После того как предел измельчения достигнут, упрочненные крупинки начинают сцепляться друг с другом в прочные рыхлые агрегаты. Дальнейшее разрушение прекращается — идет обратный процесс. И тут нас снова выручают поверхностно-активные вещества. Их добавки облегчают разрушение твердого тела, помогают развитию в нем дефектов. Это явление, называемое адсорбционным понижением прочности, было открыто и исследовано советскими учеными.

Когда тело разрушается, у него образуются новые поверхности. Работа, идущая на их образование, и есть свободная поверхностная энергия. Возьмите толстую резиновую трубку и надрежьте ее в нескольких местах поперек на разную глубину. Растяните трубку. Вы увидите, как в местах надрезов развиваются новые поверхности (рис. 6). Отпустите трубку, и надрезы благодаря упругости (эластичности)

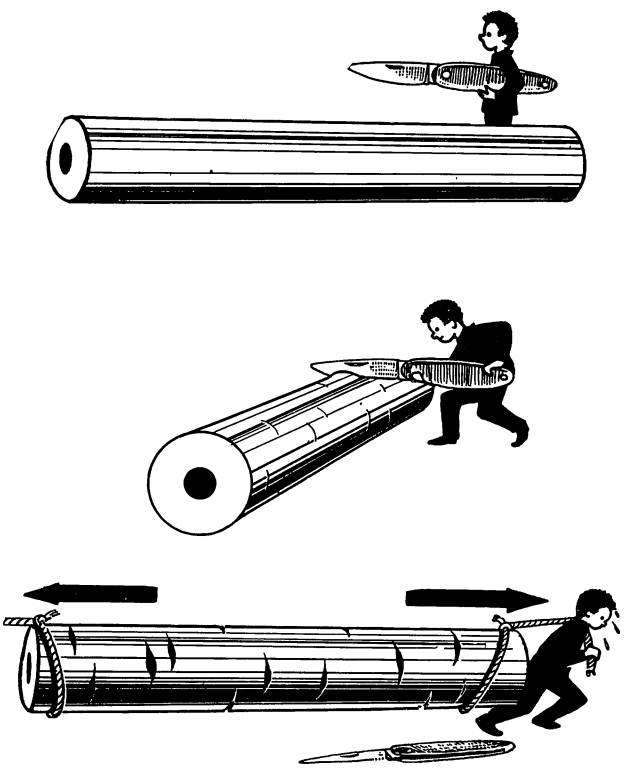


Рис. 6.

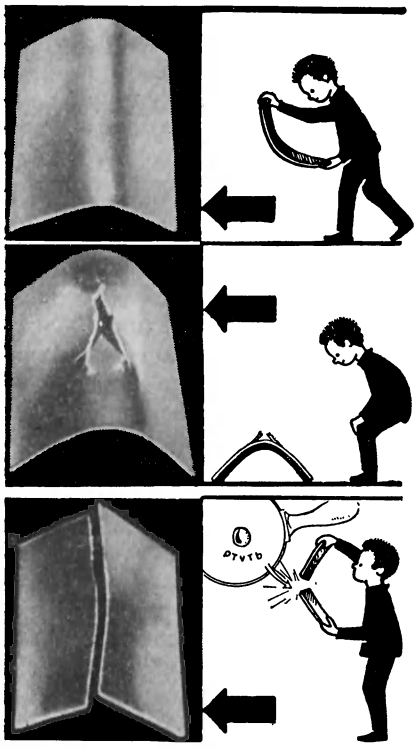



Рис. 7.

резины сомкнутся. Если же трубку растянуть до предела, она разорвется по самому глубокому надрезу. В этом месте развивался самый опасный дефект—зародыш разрушения. Работа, идущая на развитие трещины, определяется поверхностной энергией, которая и понижается в присутствии поверхностно-активных веществ. Если за время развития трещины адсорбционный слой успеет распространиться по новой поверхности и покрыть ее, работа образования трещины и сопротивление тела разрушению понизятся. Это хорошо видно у металлов, которые в обычных условиях пластичны. Пластинка из такого металла (например, цинка) деформируется пластично — обнаруживает большие остаточные деформации, не разрушаясь при изгибе. Здесь сильнодействующими поверхностно-активными веществами служат тоже металлы, только легкоплавкие и в жидком состоянии: для стали — олово, для цинка — ртуть или галлий (белый металл, плавящийся при температуре около 30° Ц). Поцарапайте немного цинковую пластинку и нанесите на обнажаемую поверхность (свободную от окисной пленки) капельку ртути. Если попытаться изогнуть пластинку, она даст трещину, а при медленном надавливании сломается, как стекло, даже не изогнувшись. Твердое тело из пластического стало хрупким, так как поверхностно-активное вещество облегчило развитие новой поверхности (рис. 7).

Невозможно растереть цинк в порошок без добавки ртути. Добавки поверхностно-активного вещества нужны для тонкого измельчения и всех других тел. Вся вновь возникающая поверхность тел должна по мере ее образования покрываться мономолекулярным адсорбционным слоем. Для обычного кварцевого песка, например, сильно поверхностно-активным веществом оказывается простая вода: ее добавка к сухому песку позволяет тонко помолоть кварц, и образующиеся мельчайшие песчинки не слипаются в агрегаты.

Мы видим, что и образование частиц нового тела при кристаллизации, и процесс разрушения (измельчения) твердых тел определяются поверхностными явлениями. И в том и в другом случае образованием таких малых, а потому и прочных крупинок твердого тела можно управлять с помощью адсорбционных слоев. Они облегчают развитие дефектов — зародышей разрушения — и могут задержать дальнейший рост мельчайших кристалликов. Такие кристаллики-зародыши могут плотно срастаться. Именно так и образуются новые сплавы, сохраняющие свою прочность до очень высокой температуры — до 3000°. Прочность таких металлов на растяжение достигает 200—300 *кгс/мм*$^2$ (по новой системе СИ — 2000—3000 *н/мм*$^2$).

Чтобы разорвать проволоку из такого металла диаметром 1 *мм*, т. е. площадью поперечного сечения около 0,8 *мм*$^2$, надо подвесить к ней груз в 200 *кг*. А какой длины должна быть такая проволока, чтобы она разорвалась от собственного веса? Представим себе, что мы подняли ее на воздушном шаре, сматывая с огромной катушки, как кабель. Вес проволоки длиной $L$ *см* и с площадью сечения $Q$ *см*$^2$ будет равен $Q\ L\ D$, где $D$ — плотность металла в *г/см*$^3$. На единицу площади сечения растягивающая сила веса составит $LD$, и, если проволока разорвется при длине $L_m$, прочность на разрыв будет $P_m = L_m D$. Отсюда $L_m = \frac{P_m}{D}$.

Для сталей $D \approx 8$ *г/см*$^3$, и, следовательно, при $P_m = 24 \cdot 10^3$ *кгс/см*$^2$ разрывная длина проволоки составит $\frac{24 \cdot 10^6}{8} = 3 \cdot 10^6$ *см*, или 30 *км*, т. е. наш воздушный шар должен быть стратостатом (рис. 8). Кстати, разрывная длина не зависит от диаметра (сечения) проволоки:

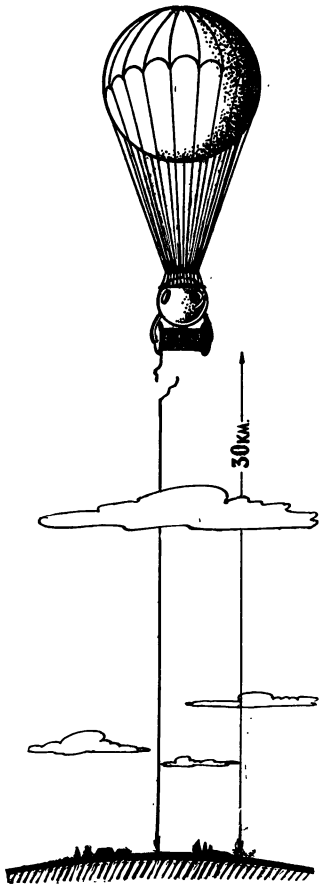


Рис. 8.

она одна и та же и для проволоки диаметром 1 *мм* и для плетеного каната. Вес проволоки будет, конечно, пропорционален площади поперечного сечения, но на единицу этой площади он будет один и тот же.

Однако, как мы уже знаем, даже такая огромная прочность значительно ниже идеальной. Чтобы приблизиться к идеальной прочности, надо, как мы видели, постараться (с участием поверхностно-активных веществ!) раскрыть все изъяны в крупинках-кристалликах, а затем сварить или плотно склеить эти крупинки.

Равномерно перемешать мельчайшие крупинки, а затем предельно плотно их упаковать — вот главная задача порошковой металлургии, а также технологии тонкой жаропрочной керамики, огнеупоров и металлокерамики. Тугоплавкие твердые тела могут быть сформованы без плавления и литья. Они формуются из тонких порошков с небольшим количеством связующего, роль которого часто играет поверхностно-активное вещество. Отформованное изделие спекается при температуре хотя и высокой, но не достигающей точки плавления. Спекание — поверхностное явление, подобное слиянию двух капель ртути в одну,— происходит благодаря уменьшению поверхностной энергии. В твердых телах ему способствует диффузия, скорость которой растет с повышением температуры.

Уплотнить мелкозернистый порошок не так-то просто. Для этого нужна огромная и дорогая прессовая аппаратура, развивающая высокие давления. Но и в таких прессах хорошо уплотняются только пластичные зерна, например зерна мягких металлов, которые как бы текут под давлением и заполняют все пустоты. Зерна же твердых, тугоплавких и хрупких материалов не текут и лишь немного (упруго) деформируются. В спрессованном материале возникают огромные внутренние (упругие) напряжения. Когда давление снимают, эти внутренние напряжения разрывают изделие иногда еще до спекания, возникает растрескивание, идет брак.

Новая отрасль науки — физико-химическая механика решает задачу, как управлять дисперсной структурой и свойствами будущего материала в процессе его образования. Физико-химическая механика предлагает эффективный и дешевый способ: все связи между крупинками разрушаются интенсивной вибрацией с частотой около 10 тыс. колебаний в минуту. Снова путь к прочности через разрушение! И дело вовсе не в том, чтобы просто подвергнуть порошок вибрированию,— вибрационные воздействия применяют в технике давным-давно. Важно знать, какой должна быть вибрация, чтобы смешение было однородным, упаковка наиболее плотной, а следовательно, и конечная прочность материала максимально высокой. Нужно, чтобы подвижность смеси стала наибольшей, т. е. разрушились бы все молекулярные связи.

Вы, конечно, догадываетесь, что и тут дело не обходится без поверхностно-активных веществ, обволакивающих каждую крупинку тончайшим смазочным слоем. Эти замечательные вещества в сочетании с предельным вибрированием и позволяют обойтись без громоздких прессов. Теперь давление для наиболее плотной упаковки требуется в сотни раз меньшее. Крупинки порошка укладываются плотно (рис. 9), внутренних напряжений не возникает, и изделие после спекания получается очень прочным.

Изменяя размеры зерен порошка, можно создавать высокопрочные тела с различной пористостью вроде фильтров, или поглотителей, или катализаторов в виде таблеток или гранул. Катализаторы — дисперсные тела с сильно развитой поверхностью пор, на которой в адсорбционных слоях быстро протекают химические реакции.

Современной химической технологии как раз и нужны прочные катализаторы, выдерживающие интенсивные газовые потоки.

Самый распространенный строительный материал — цементный бетон. Частицы тонко молотого цемента при перемешивании с водой, песком и щебнем растворяются в воде, и из раствора выкристаллизовываются гидратные

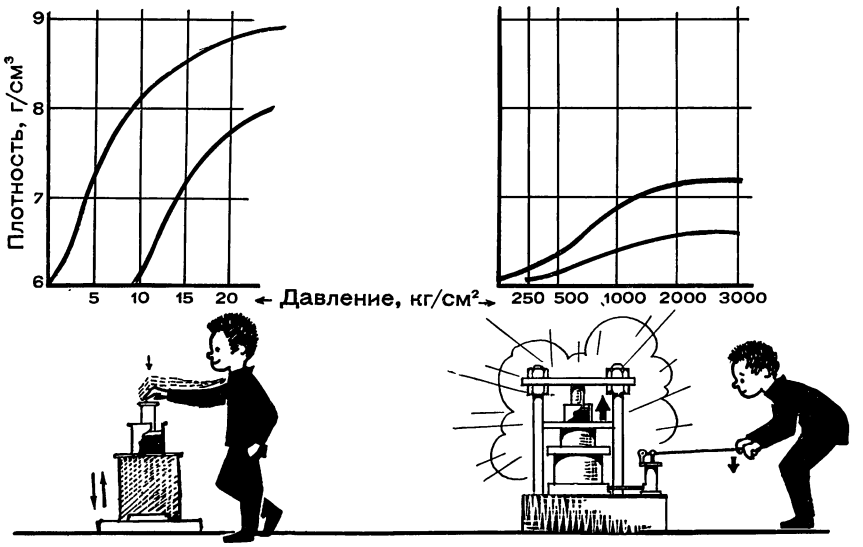



**Рис. 9. Прессование порошков:** *справа* **— без вибрации,** *слева* **— под действием вибрации. Нижняя кривая — без смазки; верхняя — с активной смазкой.**

новообразования — химические соединения цемента с водой. Кристаллики срастаются друг с другом и с поверхностью песчинок, щебня и стальной арматуры, объединяя всю массу в затвердевший монолит. Все это, казалось бы, несложно. Но беда в том, что для бетона требуется крупный песок и щебень, а того и другого не так уж много, да и бетон получается плохого качества — рыхлый, непрочный, впитывает и пропускает воду, а потом не выдерживает мороза.

Применение же методов физико-химической механики позволяет использовать в бетоне дешевый мелкозернистый песок, обходиться без дорогого щебня и получать очень плотный, однородный, а следовательно, и прочный, быстро твердеющий бетон. Выгода от этого при наших масштабах строительства огромна. Новый бетон, плотный и звонкий, как металл, не боится ни влаги, ни мороза, ни химически агрессивных жидкостей. Детали и конструкции из него гораздо более легкие, изящные и долговечные.

Изучение поверхностных явлений ведет к заветной цели современной науки о материалах — к получению материалов с заданными свойствами. Этим и занимается физико-химическая механика, возникшая на стыке технологии с физической и коллоидной химией, молекулярной физикой твердого тела и механикой материалов. Химия должна решать сегодня две основные задачи: с одной стороны, синтезировать новые вещества или извлекать уже известные вещества из природных источников и, с другой стороны, перерабатывать вещества в разнообразнейшие твердые тела (технические материалы и изделия) в строительные материалы для зданий, в детали машин, в волокна, ткани, пленки и т. д. Без решения второй задачи первая не принесет пользы: можно получить новое вещество и не найти способ, как его применять, т. е. не суметь превратить его в материал, а именно материалы — основа технического прогресса. Физико-химическая механика вручает сегодня технологам простые и универсальные методы для решения этой, второй задачи, помогая рождению новых материалов.

■

## НЕМЕТАЛЛЫ

Из этой статьи вы узнаете о большой семье элементов, которые называют неметаллами. Неметаллы, как правило, не проводят электрический ток, не ковки, не проводят тепло... По химическим свойствам неметаллы резко отличаются от типичных металлов. Вот почему эта группа элементов получила такое «отрицательное» название. Относитесь к неметаллам с уважением. Это элементы необычайно интересные и необходимые. Конечно, название «неметаллы» неудачно, но химики пока не придумали другого.

Неметаллы занимают верхний правый угол периодической системы элементов, причем в вершине этого угла находится фтор — «король» неметаллов, а граница «царства» прохо-

дит по диагонали через всю систему. Такое положение неметаллов в периодической системе, конечно, не случайно.

## ЧТО ТАКОЕ НЕМЕТАЛЛЫ

Все химические свойства элементов связаны с наружными электронными оболочками их атомов (одной или двумя). Наиболее устойчивыми бывают такие оболочки, которые состоят из восьми (неон, аргон и другие инертные газы) или из двух (гелий) электронов. Сравнительно устойчивым является также «ансамбль» из восемнадцати электронов. Движущей силой химической реакции, в которой участвуют элементы, служит стремление каждого из них к созданию устойчивого наружного слоя.

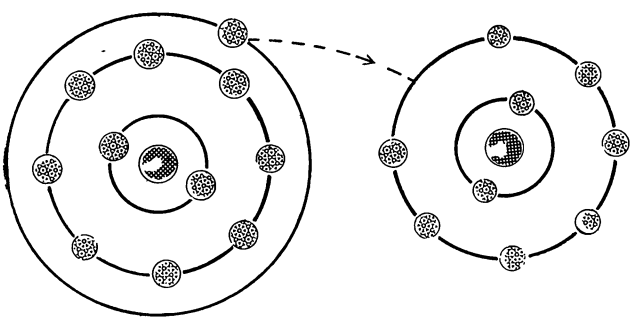


**Рис. 1. Атом натрия отдает свой единственный внешний электрон, обнажая восьмиэлектронную оболочку. Атом фтора принимает недостающий электрон. Теперь оба они имеют стабильную наружную электронную оболочку.**

Сделать это элемент может двумя способами: или **отдать** один или несколько электронов, чтобы оставшиеся электроны образовали, например, желанную «восьмерку», или **взять** недостающее число чужих электронов, «достроить» наружный слой до такого же устойчивого «ансамбля».

Посмотрим, как построены атомы некоторых элементов (рис. 1). Натрий — типичный металл, потому что для его атома (чтобы наружная оболочка стала восьмиэлектронной) достаточно отдать один электрон; этот путь самый легкий, самый выгодный. А для фтора решение достигается по-другому: взяв еще один электрон, фтор достроит свою наружную электронную оболочку до восьмиэлектронной. Для атома хлора возможны оба варианта — взять еще один электрон или отдать семь. Но все-таки первая тенденция сильнее, первый путь более выгодный.

Сравнивая для каждого элемента обе эти тенденции, ученые называют неметаллами элементы электроотрицательные, т. е. такие, которые легче принимают электроны, чем отдают их.

Когда во внешней электронной оболочке содержится уже много электронов (это относится к элементам V, VI и VII групп периодической системы), у атома должна быть сильнее тенденция брать электроны. Именно поэтому неметаллы занимают правую часть периодической системы.

Но если наружная электронная оболочка находится на большом расстоянии от положительно заряженного ядра, то ядро удерживает последние электроны слабо, они теряются легче, а значит, растут металлические свойства элементов. Поэтому в одной и той же группе, идя сверху вниз, мы встречаем все менее электроотрицательные элементы. Углерод и свинец — оба находятся в IV группе, оба содержат по 4 электрона в наружном слое, но радиус атома углерода невелик, ядро прочно удерживает электроны: углерод — неметалл. А свинец — металл, потому что из-за большого расстояния наружной электронной оболочки от ядра электроны последнего слоя легко освобождаются.

Легкость, с какой освобождаются наружные электроны, делает металлы хорошими проводниками электричества и тепла. Ведь электрический ток, текущий в металле, и есть поток таких «свободных» электронов.

Граница между неметаллами и металлами проходит не по вертикали — это результат совместного действия на электроотрицательность элемента двух факторов: размеров атома и количества электронов в последнем слое. По этой же причине переход от металлов к неметаллам происходит постепенно, нерезко.

## ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ АКТИВНОСТЬ НЕМЕТАЛЛА

Интересно разобраться, почему именно фтор часто и не без оснований называют «королем неметаллов». Активность неметалла в химических реакциях определяется легкостью, с которой его атом отнимает у других атомов электроны для достройки своей электронной оболочки. Кислороду не хватает только двух электронов, поэтому он активнее азота, которому нужно три. По сравнению с серой кислород также более активен, но уже по другой причине — у кислорода меньше радиус атома. Ясно, что

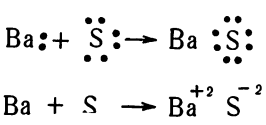
фтор активнее своих соседей — кислорода и хлора, не говоря уже о других неметаллах. Самый малый радиус атома и наличие в последнем слое семи электронов делает фтор активнейшим среди неметаллов. А если это так, то в химических реакциях невозможно отобрать у иона $F^-$ «лишний» электрон и выделить фтор в свободном состоянии. Именно поэтому этот элемент был получен последним из всех галогенов, и для этого понадобилось более 100 лет упорных поисков.

В наше время фтор получают в достаточном количестве. Действуя электрическим током на расплавленный фтористый калий, удается отнять восьмой электрон у иона фтора и выделить этот элемент в свободном состоянии.

## ПОЧЕМУ НЕМЕТАЛЛЫ ПРОЯВЛЯЮТ ПОЛОЖИТЕЛЬНУЮ И ОТРИЦАТЕЛЬНУЮ ВАЛЕНТНОСТЬ

Когда вступают в реакцию два атома, один из них отдает электроны другому с тем, чтобы оба элемента приобрели устойчивую наружную электронную оболочку. Допустим, произошла встреча атома серы с атомом металла бария. На последней оболочке атома бария два электрона, как раз столько, сколько не хватает атому серы, чтобы дополнить свою шестиэлектронную оболочку.

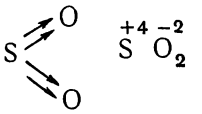
Оба атома соединяются между собой:



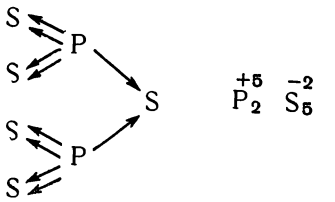
$$Ba + S \rightarrow Ba^{+2}\,S^{-2}$$

Сера взяла два электрона и проявила, таким образом, **отрицательную** валентность, равную двум. Барий отдал два электрона и проявил **положительную** валентность, также равную двум. Образовавшийся положительный ион $Ba^{+2}$ и отрицательный ион $S^{-2}$ притягиваются друг к другу и образуют молекулу. Связь бария и серы в этой молекуле называется ионной. Как общее правило, металлы проявляют положительную валентность потому, что всегда отдают свои наружные электроны. В соединениях с металлами сера, как и другие неметаллы, всегда проявляет отрицательную валентность, потому что берет электроны в наружный слой.

Ну, а если происходит соединение двух неметаллов? Когда сера соединяется с кислородом или хлором, она отдает свои электроны (ведь и кислород и хлор активнее серы) и потому проявляет положительную валентность. Переход электронов от одного неметалла к другому часто обозначают стрелками:



Но если сера взаимодействует с фосфором, то по праву более сильного она отнимает электроны и потому проявляет отрицательную валентность:



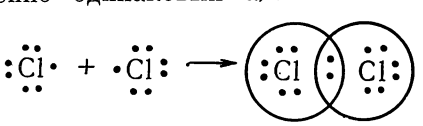
Вот почему неметаллы могут проявлять как положительную, так и отрицательную валентность в своих соединениях. Правда, не все неметаллы. Активнейшие из них — фтор и кислород — никогда не отдают своих электронов другим неметаллам и потому проявляют в соединениях только отрицательную валентность.

Впрочем, нельзя говорить в полном смысле слова: «сера отдает электроны хлору». Когда мы пишем $P_2^{+5}S_5^{-2}$, то цифры + 5 и — 2 совсем не означают, что молекула состоит из пятизарядных положительных ионов фосфора и двузарядных отрицательных ионов серы.

Почему же все-таки эту формулировку и эту форму записи можно применять? Отвечать на этот вопрос мы начнем с объяснения странного с точки зрения арифметики равенства:

## СЕМЬ + СЕМЬ = ВОСЕМЬ И ВОСЕМЬ...

Перед нами реакция взаимодействия двух совершенно одинаковых атомов:



Из двух семиэлектронных оболочек образовались ... две восьмиэлектронные!

Подобным образом возникает и молекула азота:

Теперь у каждого атома образовалась устойчивая электронная оболочка, но оба атома **коллективно** владеют одной или несколькими парами электронов. Такую связь двух атомов принято называть к о в а л е н т н о й.

Здесь мы впервые встречаемся с очень важной и интересной закономерностью, которую можно было бы назвать...

## ПРАВИЛО ЭЛЕКТРОННЫХ ПАР

Оказывается, закономерности, управляющие движением электронов на оболочках атомов, таковы, что наиболее выгодно состояние, при котором все электроны распределены по **парам** и их общее число **четное**. Например, хлор или йод, на последней оболочке атома которых движутся семь электронов, проявляют преимущественно только нечетную валентность: $-1$, $+1$, $+3$, $+5$, $+7$. Сера (6 электронов на последней оболочке) в своих устойчивых соединениях проявляет четную валентность: $-2$, $+4$, $+6$.

Почему так ? А вот почему: отдай сера 3 электрона, она имела бы валентность $+3$, но тогда один из оставшихся трех электронов был бы непарным, а это невыгодно. Хлор же, отдав нечетное число электронов, все оставшиеся электроны группирует по парам. Поэтому-то валентность его только нечетная.

Ковалентная связь, при которой два атома имеют общую пару электронов, очень характерна для неметаллов. Но если соединились неодинаковые атомы (например, хлор и водород), то общая электронная пара все же больше принадлежит активному неметаллу. Она как бы «сдвинута» ближе к более активному неметаллу. Такую ковалентную связь называют п о л я р н о й.

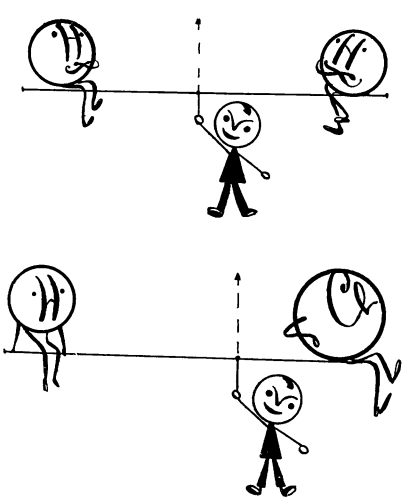
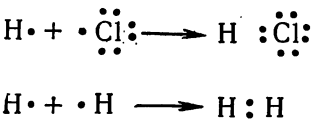
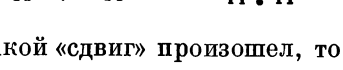


**Рис. 2. Если ковалентная связь образуется между атомами двух разных неметаллов, то «центр тяжести» электрических зарядов такой молекулы находится не на равном расстоянии от каждого атома, а ближе к атому, заряд ядра которого больше. Это смещение приводит к тому, что связь становится полярной.**

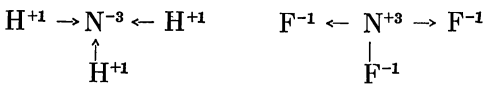




Но если такой «сдвиг» произошел, то в молекуле $H^+Cl^-$ водород частично положителен, а хлор частично отрицателен: обе эти частицы еще не ионы, но это уже, так сказать, «зародыш» ионов, которые образуются, например, в растворе хлористого водорода под действием молекул воды.

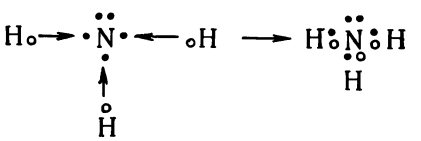
А вот молекула водорода ионов в водном растворе дать не может, потому что в этой молекуле таких ионов нет даже в «зародыше».

Теперь мы можем смело употреблять выражение: «неметалл А отдал неметаллу Б свои электроны», понимая, что речь идет не о полной отдаче, а о «сдвиге» электронов в сторону более активного неметалла. И в этом смысле более активный неметалл становится отрицательным, а менее активный — положительным:



Как правило, соединяющиеся неметаллы создают общую электронную пару «на равных условиях» — каждый отдает в общее пользование по одному электрону.

Но бывает и иначе... Вот как образуется молекула аммиака из атомов азота и водорода:



Как видно из этой схемы, три электронные пары, созданные «общими усилиями», связывают атом азота с тремя атомами водорода, а одна электронная пара азота остается «свободной», незанятой. Но стоит аммиаку попасть в раствор какой-нибудь кислоты, содержащий ионы водорода (в них водород лишен своего электрона), как такие ионы «зайцем» занимают свободную

электронную пару азота — и уже невозможно отличить «бесплатного» пассажира от трех других атомов водорода. Так образуется комплексный ион аммония $NH_4^+$, а связь, образованную парой электронов, ранее принадлежавшей целиком одному атому, называют координационной связью.

Ионы водорода в водных растворах связываются с молекулами воды координационной связью и дают комплексный ион гидроксония $H_3O^+$, так что представление о том, что в растворах кислоты существуют **свободные** ионы водорода, нуждается в уточнении.

## АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВ

Давайте теперь разберемся, как уже готовые молекулы одного и того же соединения относятся друг к другу. Это поможет нам понять, от чего зависит агрегатное состояние веществ, т. е. почему одни вещества — газы, другие — жидкости, а третьи — твердые тела. Случайно ли, что водород, кислород, азот, хлор — газы? Почему соединения неметаллов с водородом — это газы или жидкости? Как объяснить, что почти все минеральные кислоты — жидкости, а их соли — твердые вещества?

Агрегатное состояние вещества зависит от расстояния между его частицами и от степени их взаимодействия друг с другом. Сила притяжения молекул друг к другу — это главным образом сила электростатическая.

Посмотрите, как построен кристалл поваренной соли (рис. 3). Каждый ион здесь окружен шестью ионами противоположного знака. Попробуйте-ка определить, где кончается одна молекула NaCl и начинается другая! Весь кристалл — как одна гигантская молекула, состоящая из крепко спаянных ионов. По этой причине **ионные** соединения — **твердые** вещества с высокой температурой плавления. Не удивительно поэтому, что поваренная соль плавится лишь при 800°, а кипит при 1413°.

Если связь между атомами **полярная**, то концы молекул противоположно заряжены. Такие **диполи** ориентируются так, что разноименные полюса поворачиваются друг к другу, несколько молекул взаимно притягиваются, ассоциируются. Конечно, такое взаимодействие более слабое, чем ионное. Поэтому вещества с **полярными** связями в молекуле (например, вода, многие кислоты) — это **жидкости** или **газы**, легко превращающиеся в жидкости.

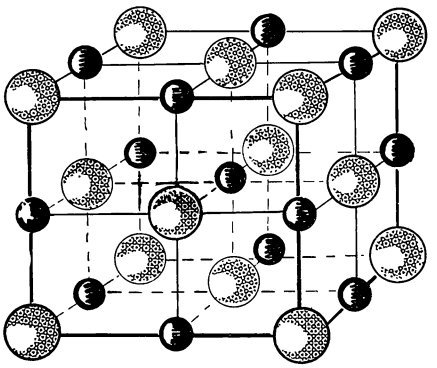


Рис. 3.

Наконец, если связи в молекуле **неполярны**, взаимодействие между молекулами совсем слабое, а подобные вещества в обычных условиях — **газы**. Именно поэтому атмосфера Земли — своеобразная «копилка» неметаллов — азота и кислорода, а также соединений неметаллов — углекислого газа и паров воды. Наши рассуждения касаются лишь сравнительно простых соединений и неприменимы к **полимерам** и вообще к веществам с молекулами очень больших размеров.

## МЕСТО НЕМЕТАЛЛОВ В ПРИРОДЕ

Сочетание атомов сотни химических элементов образует все вещества живой и неживой природы... Но встречаются в природе атомы

Рис. 4. Наблюдая звезды, туманности и межзвездное пространство, ученые узнают, из каких химических элементов состоит их вещество.

тех или иных химических элементов не одинаково часто. Во Вселенной, как показывают расчеты, на каждые 100 000 атомов приходится в среднем 90 000 атомов водорода, 9800 атомов гелия, 1970 атомов кислорода, азота, углерода и неона; число атомов железа, кремния и магния составляет 100, а атомов всех остальных элементов — всего 30 на 100 000. Итак, подавляющее большинство атомов Вселенной — это атомы неметаллов.

Состав нашей планеты очень отличается от среднего состава Вселенной. Пока еще недостаточно хорошо знают, как распространены химические элементы в глубоких недрах Земли. Но в самых верхних слоях ее — в земной коре, атмосфере и гидросфере — также преобладают неметаллы: кислород, кремний, водород, азот, углерод.

Правда, причины господства неметаллов в космосе иные, чем в земных условиях. Дело в том, что атомы неметаллов — легких элементов с относительно небольшим атомным весом — образуются в звездных «термоядерных реакторах» в бо́льших количествах, чем атомы тяжелых элементов, занимающих «подвал» периодической системы. Преобладание неметаллов в наружных слоях нашей планеты связано с их химическим характером, физико-химическими свойствами их соединений.

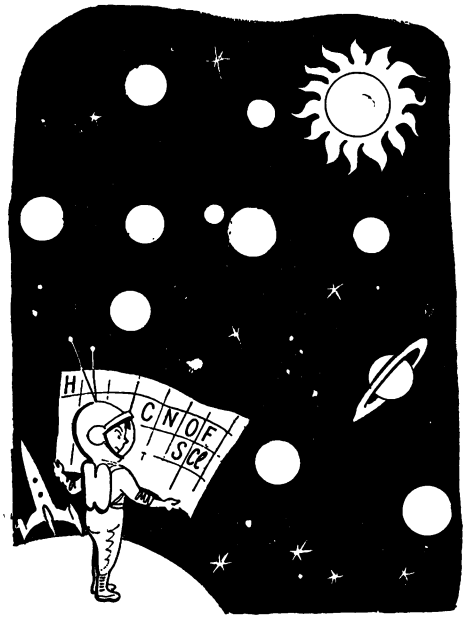



**Рис. 5. В ближнем космосе — в нашей солнечной системе — господствуют неметаллы. Считают, что Юпитер и Сатурн на $^3/_4$ состоят из водорода...**

**Рис. 6. Вулканические газы — «водоворот» неметаллов и их соединений.**

Изливающаяся из кратера вулкана лава состоит из сравнительно легкоплавких соединений, главные составные части которых кремний и кислород. Из этих соединений и образовалась когда-то земная кора. Главные из них — гранит и базальт. Обе эти горные породы — силикаты, т. е. соли кремневой кислоты. Кроме кремния и кислорода, они содержат алюминий и в меньших количествах натрий, калий, кальций, железо и магний. Вулканы выносят из недр Земли также пары воды, углекислый газ, серу, сероводород и сернистый газ, азот и аммиак, галогеноводороды и их летучие соли, водород и метан. Что общего у всех этих веществ? Все они неметаллы или их соединения. А ведь именно такие вещества легколетучи.

Помните, как герои сказок иногда демонстрируют свою силу, выжимая воду из камня? Сказка сказкой, а при совсем не сказочном процессе плавления гранита из каждого кубического километра этой горной породы выделяется в среднем 26 млн. *т* воды, 5,3 млн. *м*$^3$ водорода и много других летучих веществ... Эти летучие вещества и дали начало первичной атмосфере нашей планеты.

После охлаждения поверхности Земли ниже 100° на нее изливались потоки горячих кислот, извлекавшие из горных пород ионы металлов. Пройдя огонь и воду, гранитные горы рассыпа-

лись в песок, превращались в глину, давая вместе с нерастворимыми карбонатами осадочные породы...

Отступающее море оставляло после себя залежи солей, титанические сжатия земной коры изменяли лицо Земли и характер горных пород. Процессы перераспределения элементов шли уже на поверхности Земли. Еще позже в судьбу неметаллов активно вмешались живые организмы...

По содержанию в наружных сферах Земли все рекорды побивают два вещества — вода и двуокись кремния. Достаточно сказать, что океан занимает примерно три четверти поверхности Земли при средней глубине его около 4 *км*, а общее количество свободной воды считают сейчас равным около 1,4 млрд. $км^3$.

А ведь в объеме, равном одному кубическому километру, можно разместить все дома большого современного города! Горные породы содержат в среднем около 60% двуокиси кремния, а граниты — до 80%. Разновидностей двуокиси кремния известно очень много, начиная от обычного песка и кончая прекрасными кристаллами горного хрусталя и драгоценных камней.

Если бы мы захотели составить словарь всех известных химических соединений (не считая органических!), то получилась бы, в общем, не очень большая книга — в нее пришлось бы записать 50—60 тысяч названий. А если выбрать лишь те вещества, которые встречаются в естественном состоянии, способны к длительному существованию и составляют основную массу наружных сфер Земли, то словарь наш резко сократится: в него войдут примерно 2000 названий минералов, но и здесь символы неметаллов будут занимать главное место.

В виде каких соединений чаще всего встречаются в природе неметаллы? Углерод встречается чаще в виде карбонатов; азот — в виде нитратов и солей аммония; фосфор — фосфатов; сера — сульфатов и сульфидов; наконец, галогены встречаются в основном в виде солей галогеноводородных кислот.

Главные минералы, в состав которых входят неметаллы,—это либо окислы, либо соли кислот (кислородных и бескислородных).

## КИСЛОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НЕМЕТАЛЛОВ

Неметаллы, за исключением галогенов, с большей или меньшей легкостью соединяются

**Рис. 7. Прекрасные правильные кристаллы кварца и их целые семейства — друзы, как и обычный песок,— это формы существования двуокиси кремния.**

с кислородом и образуют окислы. Окислы галогенов получают косвенным путем.

Как известно, большинство неметаллов может иметь переменную валентность. Поэтому известен не один, а несколько окислов каждого неметалла: два — для углерода ($CO_2$ и $CO$), пять—для азота, два—для серы и т. д.

В окислах отчетливо проявляются **свойства** неметаллов и их **периодичность.** Возьмем, к примеру, высшие окислы неметаллов третьего периода. Вот они: $SiO_2$, $P_2O_5$, $SO_3$, $Cl_2O_7$.
Как и положено окислам неметаллов, их гидраты — это кислоты:

| Группы: | IV | V | VI | VII |
|---|---|---|---|---|
| | $H_2SiO_3$ кремневая | $H_3PO_4$ фосфорная | $H_2SO_4$ серная | $HClO_4$ хлорная |

Сила кислоты определяется легкостью, с которой кислота в водном растворе диссоциирует, давая ионы водорода:

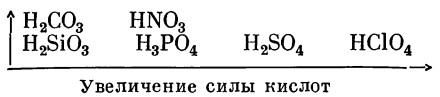
$$HNO_3 \rightleftarrows H^+ + NO_3^-$$

или, точнее,

$$H_2O + HNO_3 \rightleftarrows H_3O^+ + NO_3^-.$$

Поэтому кислота тем сильнее, чем прочнее связь центрального атома неметалла с кислородом и чем слабее связь с кислородом атома водорода. Ясно, что увеличение заряда, т. е. рост валентности центрального атома неметалла, и уменьшение его радиуса увеличивает силу кислоты. Так, кремневая кислота — слабая, фосфорная — средней силы, серная — сильная, хлорная — очень сильная кислота. В то же вре-

мя известно, что угольная кислота сильнее кремневой, а азотная сильнее фосфорной:




Если неметалл образует несколько кислот, то наиболее сильной из них будет та, в которой неметалл проявляет максимальную валентность. Например, серная кислота (сильная) и сернистая кислота (слабая). Или ряд кислот хлора:

| +7 | +5 | +3 | +1 |
|---|---|---|---|
| $HClO_4$ | $HClO_3$ | $HClO_2$ | HClO |
| хлорная | хлорноватая | хлористая | хлорноватистая |

Увеличение силы кислот

Окислы низших валентностей часто совсем не взаимодействуют с водой и потому называются безразличными: CO, $N_2O$, NO.

Отметим два особенных окисла. Один из них — соединение фтора с кислородом. Получают его, пропуская фтор через слабый раствор щелочи:

$$2NaOH + 2F_2 \rightarrow 2NaF + H_2O + F_2O.$$

В этом соединении — и только в нем! — кислород проявляет положительную валентность, так как электронные пары, связывающие атомы фтора с кислородом, смещены к более активному фтору. Другая интересная особенность характерна для двуокиси кремния. В отличие от газообразной двуокиси углерода, своего ближайшего аналога, $SiO_2$ — вещество твердое, прочное и тугоплавкое (плавится лишь при 1713°!). Это объясняется особенным строением кристалла двуокиси кремния.

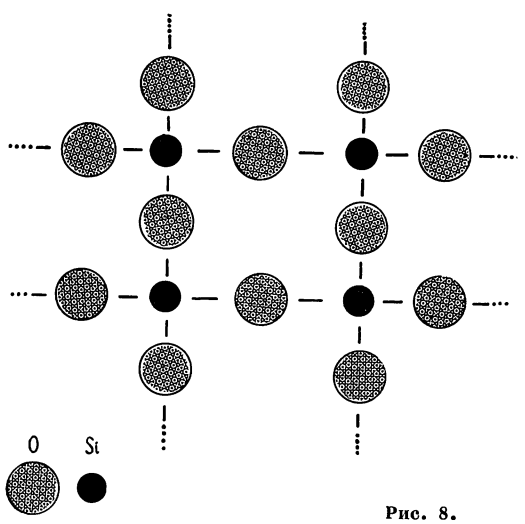



Рис. 8.

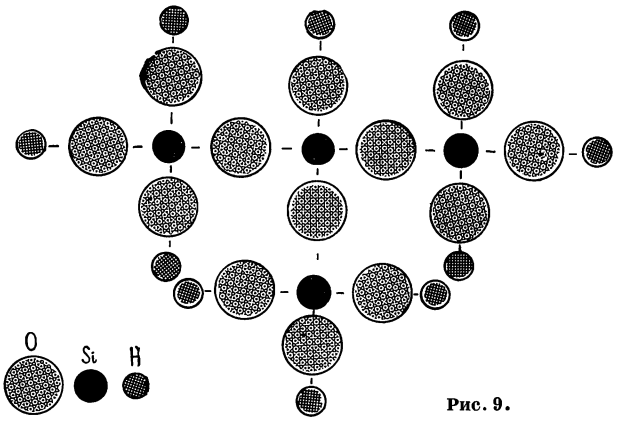



Рис. 9.

Как видно на рисунке 8, каждый атом кремния в кристалле фактически связан не с двумя атомами кислорода, как в молекуле $CO_2$, а с четырьмя, так что образуется очень прочная структура. По этой причине двуокись кремния не растворяется в воде, а кремневая кислота, отвечающая этому окислу и получаемая косвенным путем, также состоит не из отдельных молекул $H_2SiO_3$, а частично сохраняет свойственную двуокиси кремния сетчатую структуру (рис. 9). Именно поэтому кремневая кислота, в отличие от других минеральных кислот, нерастворима в воде, не является жидкостью и нелетуча.

## ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НЕМЕТАЛЛОВ

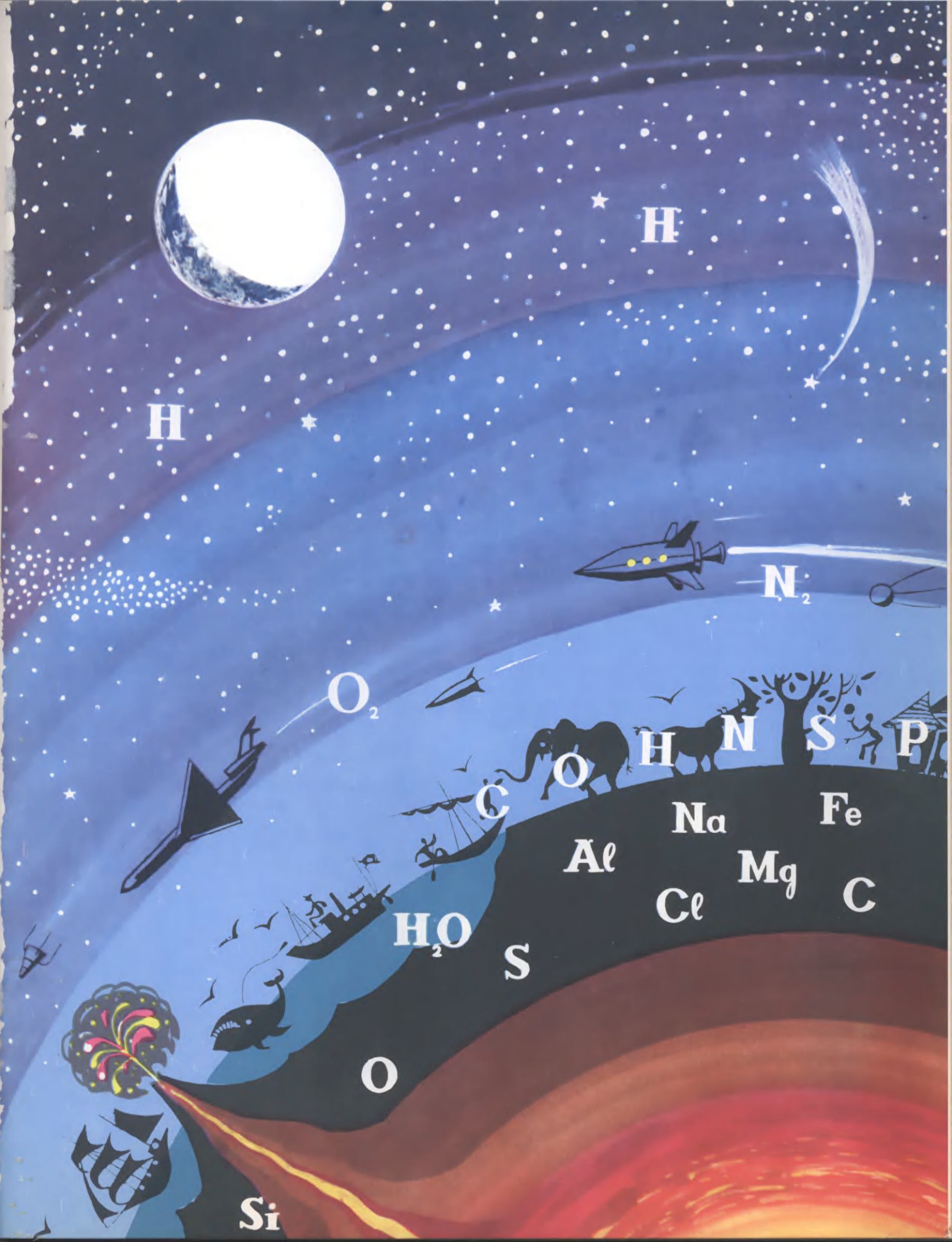
В табличке собраны некоторые простейшие водородные соединения (гидриды) неметаллов:

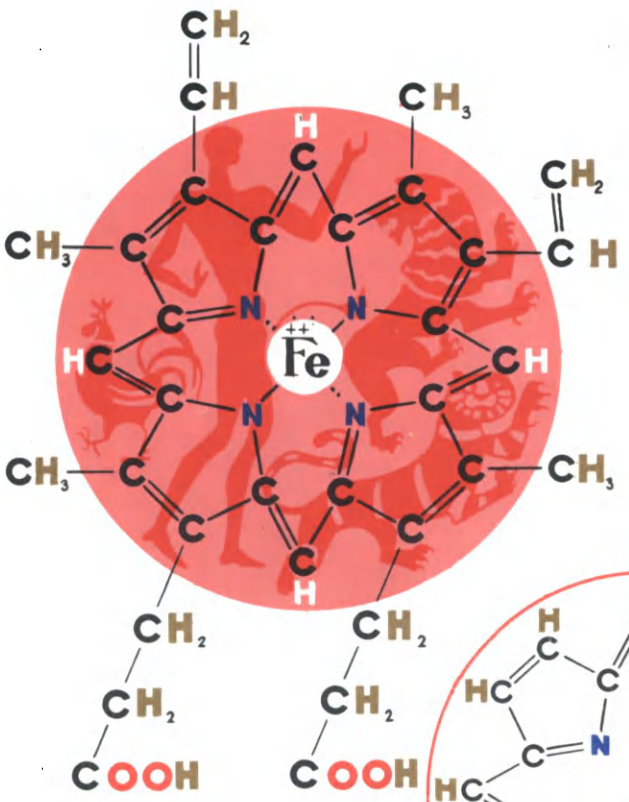
| Группы: | IV | V | VI | VII |
|---|---|---|---|---|
| | $CH_4$ | $NH_3$ | $H_2O$ | HF |
| | | $PH_3$ | $H_2S$ | HCl |
| | | | $H_2Se$ | HBr |
| | | | | HJ |

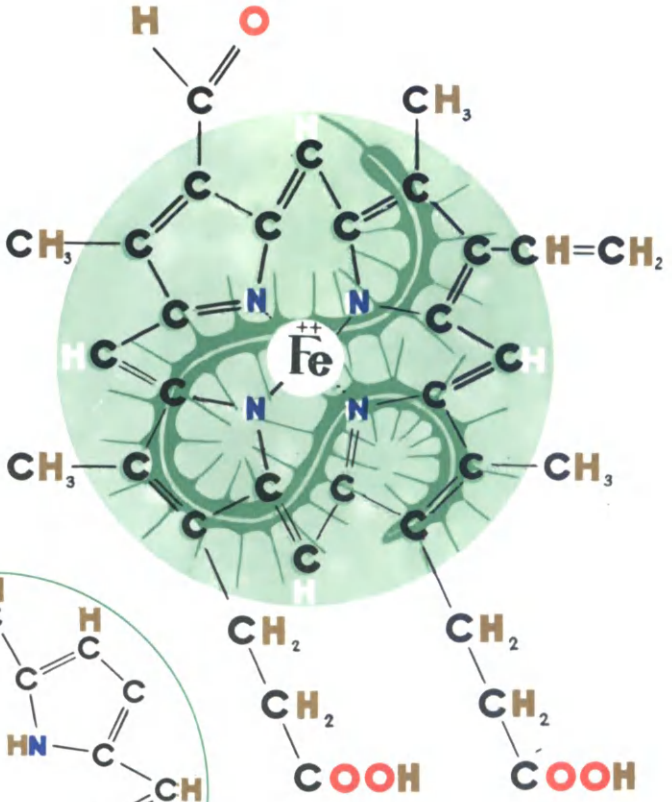
Физические свойства гидридов в целом изменяются закономерно в пределах каждой группы: чем ниже стоит неметалл, тем выше температура кипения его гидрида и тем легче можно превратить газообразный гидрид в жидкость.

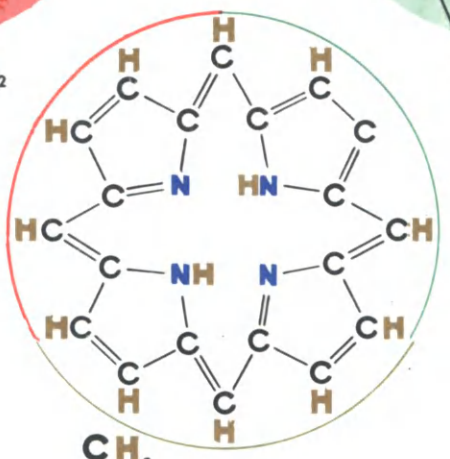
*Таблица к статье «Неметаллы»*

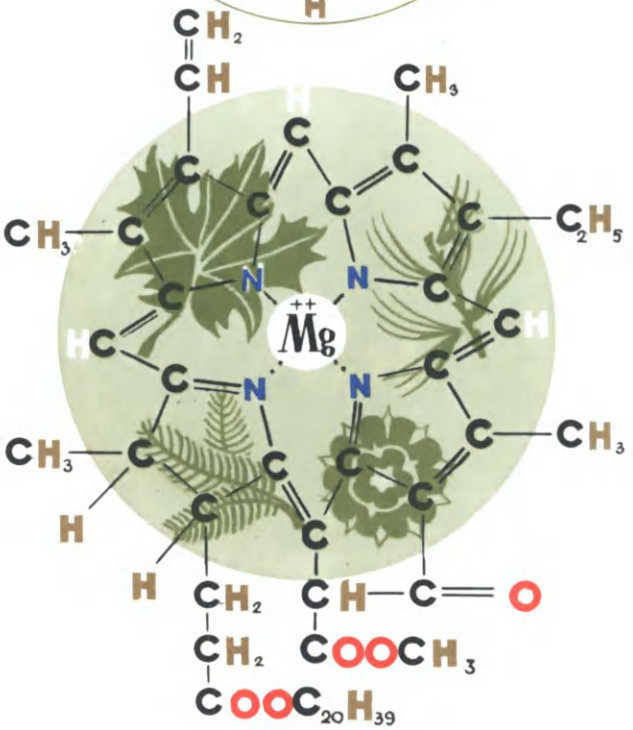
**В твердом поверхностном слое Земли из каждой 1000 атомов 820 — атомы двух неметаллов: кислорода и кремния. Лишь 126 атомов принадлежат четырем самым распространенным металлам — алюминию, железу, магнию и натрию. Подавляющее большинство атомов других неметаллов сосредоточено также в верхних оболочках Земли — литосфере, атмосфере, гидросфере. Вселенная в целом более чем на 90% состоит из атомов водорода.**


H
H
$N_2$
$O_2$
H
N
S
P
O
C
Na
Fe
Al
Mg
Cl
C
$H_2O$
S
O
Si


Fe


Fe



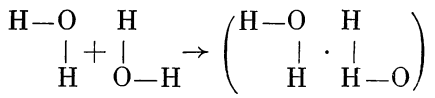

Mg

Однако поведение аммиака, воды и фтористого водорода нарушает общую логику: температура кипения и плавления этих соединений аномально высока.

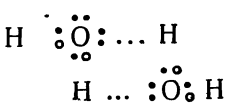
Дело в том, что их молекулы ассоциированы и не отвечают их простейшей формуле. Так, даже в кипящем фтористом водороде (+20°) средний состав его отвечает формуле $(HF)_4$ и лишь при 90° пары состоят из молекул HF. Аналогично, хотя и в меньшей степени, ассоциированы молекулы жидкого аммиака. Вода в обычных условиях, кроме простейших молекул $H_2O$, содержит молекулы $(H_2O)_2$, $(H_2O)_3$...

Связь между молекулами воды в таких «двойных» и «тройных» молекулярных агрегатах из-за ее относительной прочности нельзя объяснить лишь обычной ориентацией диполей.

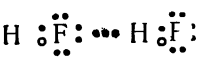
Как происходит такая ассоциация молекул?



Чтобы это было ясно, вспомним, что каждая валентная черточка символизирует общую пару электронов ковалентно связанных атомов. Кроме того, атом кислорода имеет и «свободную», только ему принадлежащую пару электронов. Поэтому атом водорода имеет возможность связаться не только со «своим» атомом кислорода, но и с «чужим». Правда, такая связь менее прочна, чем обычная ковалентная связь. Называют ее водородной связью.



Таким же образом происходит ассоциация молекул фтористого водорода:



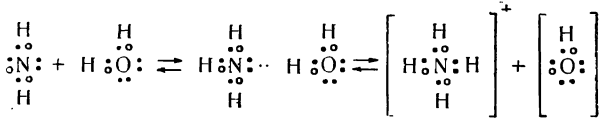
В этом случае водородная связь оказывается особенно прочной, так что в растворах фтористоводородной кислоты, кроме привычных нам ионов:

$$H_2O + HF \rightleftarrows H_3O^+ + F^-,$$

образуются также и ассоциированные ионы:

$$H_2O + 2HF \rightleftarrows H_3O^+ + HF_2^-.$$

Водородная связь похожа на уже знакомую нам координационную связь, образованную за счет «чужой» пары электронов. Такая связь образуется не обязательно между одинаковыми молекулами. Вот что происходит, например, при растворении аммиака в воде:



В свойствах гидридов отчетливо проявляется периодичность. Возьмем, к примеру, гидриды неметаллов второго периода. Метан — вещество совершенно **нейтрального** характера, своеобразный «инертный» газ. Далее следует аммиак, способный присоединять ионы водорода и потому обладающий **основными** свойствами. Фтористый водород, как известно, **кислота**, а вода, стоящая в нашей таблице между аммиаком и фтористым водородом, в определенном смысле является **амфотерным электролитом.** В самом деле, в реакции с аммиаком вода ведет себя как кислота (**отдает** протон):

$$NH_3 + H_2O \rightleftarrows NH_4^+ + OH^-.$$

При взаимодействии же с фтористым водородом она **связывает** протон, т. е. ведет себя как основание:

$$H_2O + HF \rightleftarrows H_3O^+ + F^-.$$

Чем ниже стоит гидрид в нашей таблице, тем слабее становятся его основные свойства, если измерять их способностью реагировать с кислотами. Действительно, широко известны соли аммония, образующиеся из аммиака и кислот. А гидрид фосфора $PH_3$, который в принципе тоже способен присоединять протон, давая ион фосфония $PH_4^+$, образует лишь несколько устойчивых солей с самыми сильными кислотами, например $(PH_4)^+ClO_4^-$.

Кислотные же свойства гидридов, наоборот, увеличиваются сверху вниз. Так, кислотные свойства у сероводорода выше, чем у воды,

***Таблица к статье «Неметаллы»***

**...Зеленые деревья и бурые водоросли, черви, высшие животные и человек — как бы ни были различны эти проявления жизни, они тесно связаны с одинаковой в своей основе структурой, изображенной в центре рисунка. Это — порфин. В состав гемоглобина — красящего вещества крови человека и высших животных — входит скелет порфина с боковыми цепями, содержащий в центре молекулы ион железа. Такую структуру называют гем (*слева вверху*). А незначительное изменение лишь одной боковой цепи молекулы гема приводит к красящему веществу крови некоторых червей. Цвет такой крови зеленый (*справа вверху*). Магний — центральный атом зеленого хлорофилла, в основе которого лежит несколько измененный порфиновый скелет (*внизу*). В состав синей крови некоторых моллюсков входит медь, а некоторые обитатели морей собирают в крови ванадий...**

а из галогеноводородных кислот самая слабая фтористоводородная. На примере гидридов неметаллов можно проследить действие важнейшего закона природы: между самыми противоположными свойствами нет непроходимой границы, во всяком явлении борются противоположные тенденции, причем в зависимости от условий либо побеждает одна из них, либо происходит их синтез, совмещение, переход одной противоположности в другую. Этот закон поможет нам понять некоторые интересные явления, быть может несколько неожиданные и необычные.

## ПАРАДОКСЫ В СЕМЬЕ НЕМЕТАЛЛОВ

Ни у кого не вызовет удивления бесспорное утверждение, что кислота реагирует с основаниями. Но иногда кислоты способны в определенных условиях вступать в реакции между собой. Так, **концентрированная** азотная кислота в смеси с серной кислотой отщепляет уже не ионы водорода (точнее, не ионы гидроксония $H_3O^+$), а гидроксильную группу:

$$HONO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftarrows NO_2^+ + H_3O^+ + 2HSO_4^-.$$

Известна и такая реакция:

$$HNO_3 + 2HF \rightleftarrows H_3O^+ + NO_2^+ + 2F^-.$$

Выходит, что в этих случаях азотная кислота ведет себя... как основание.

«Отменяет» ли это наши прежние представления о кислотах? Конечно, нет!

Мы не случайно выделили слово **концентрированная** кислота. В ней нет или почти нет воды, а это имеет решающее значение, потому что все наши школьные знания о кислотах и основаниях относятся к водным растворам. Стоит нам изменить это условие, и многие привычные представления меняются и требуют уточнения.

Вот еще один «парадокс». В обычных условиях для аммиака характерны основные свойства. Но при изучении свойств жидкого аммиака (при —33,4°) оказалось, что его водород может замещаться металлом с образованием амидов:

$$2NH_3 + 2Na \rightarrow 2NaNH_2 + H_2.$$

Удивительно, что эта же реакция происходит и при высоких температурах (+350°). Вот и получается, что аммиак может вести себя в реакциях с металлами... как кислота!

И хотя условия реакции с металлами несколько различны, аммиак, вода и фтористый водород в этой реакции очень сходны:

$$2Na + 2NH_3 \rightarrow 2NaNH_2 + H_2\uparrow$$
$$2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2\uparrow$$
$$2Na + 2HF \rightarrow 2NaF + H_2\uparrow$$

Такое же сходство обнаруживается и при сравнении основных свойств этих гидридов:

$$NH_3 + HClO_4 \rightarrow (NH_4)^+ClO_4^-$$
$$H_2O + HClO_4 \rightarrow (H_3O)^+ClO_4^-$$
$$HF + HClO_4 \rightarrow (H_2F)^+ClO_4^-$$

Как это ни парадоксально, фтористый водород здесь выступает в роли основания, т. е. связывает протон.

Правда, последняя реакция исключительна, потому что возможна лишь с сильнейшей из минеральных кислот — хлорной, которая одна только способна «заставить» фтористый водород играть необычную для него роль.

Нетрудно видеть, что эта необычность свойств обычных соединений связана с особенными условиями, в которые эти соединения мы поставили. Но есть одно простейшее и распространеннейшее соединение, свойства которого во многом необычны в самых «заурядных» условиях. Это соединение — вода (см. ст. «Беседа о самом необыкновенном в мире веществе»).

## СВОБОДНЫЕ НЕМЕТАЛЛЫ В ПРИРОДЕ

В число десяти элементов, знакомых людям с глубокой древности, входят два неметалла — углерод и сера. Оба элемента встречаются в природе в свободном состоянии.

Молекула серы состоит из восьми атомов, соединяющихся друг с другом в кольцо. При нагревании такие кольца разрываются, а при более высокой температуре образовавшиеся цепочки укорачиваются, так что сера становится смесью молекул, содержащих 8, 6 и 2 атома. При очень высокой температуре пары серы состоят из молекул $S_2$, т. е. построены так же, как молекулы кислорода, азота, хлора в обычных условиях. Самое устойчивое состояние серы — кольцеобразная молекула $S_8$. При быстром охлаждении расплавленной серы разорванные кольца не успевают замкнуться и сера становится пластичной, а затем, превращаясь в самую устойчивую форму, возвращает себе привычный внешний вид и свойства.

Так проявляется один из самых универсальных законов: все процессы в природе идут так, чтобы достигалось самое устойчивое состояние, энергия которого самая маленькая (камень падает с горы, потому что у ее подножия он будет обладать самой маленькой потенциальной энергией; сжатая пружина разжимается, потому что это ведет к снижению ее потенциальной энергии; атом любого элемента стремится к образованию устойчивой наружной оболочки, так как это тоже отвечает минимуму энергии).

Углерод встречается в природе в двух различных формах (аллотропических видоизменениях), отличающихся друг от друга строением кристаллической решетки: это — алмаз и графит. Люди не сразу пришли к пониманию того, что благороднейший алмаз и невзрачный уголь — близнецы. А между тем установить это было совсем просто: в один прекрасный день с помощью линзы сконцентрировали солнечные лучи на кристаллике алмаза, помещенного под стеклянный колпак. Алмаз... сгорел, а под колпаком образовался углекислый газ — тот же самый, что образуется при горении угля...

Если алмаз — одно из редчайших произведений природы, то графит и уголь образуют мощные залежи. Правда, уголь почти никогда не состоит из чистого углерода, а всегда содержит различные примеси.

Недавно было установлено, что обычная сажа имеет строение, похожее на строение графита.

**Рис. 10. Пучок солнечных лучей, сконцентрированный линзой и направленный на кристалл алмаза, сжигал «царя минералов» и превращал его совершенно так же, как и кусочек обычного угля, в углекислый газ.**

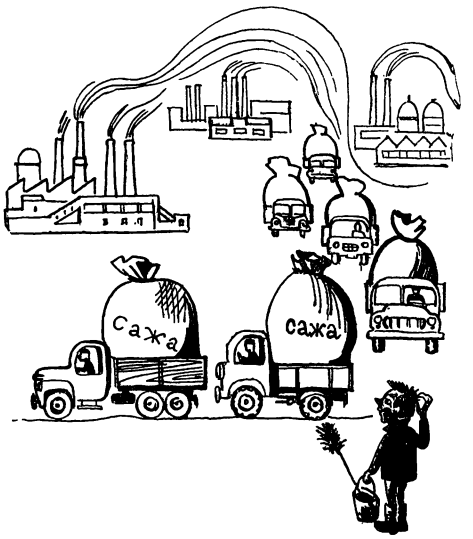



**Рис. 11. Много хитроумных способов придумали люди, чтобы обеспечить наиболее полное сгорание топлива — без дыма, копоти и сажи. Но вряд ли еще 50 лет назад кто-нибудь мог предполагать, что сегодня целые заводы будут решать совсем обратную задачу: получать при горении топлива как можно больше сажи, которая очень нужна промышленности, прежде всего резиновой.**

В течение долгого времени она причиняла людям одни неприятности, засоряя дымоходы, загрязняя воздух. Сажу использовали лишь для приготовления красок, туши и т. п. Но в последние десятилетия ее стали специально готовить, причем для этого пришлось строить большие заводы, придумывать способ сжигать топливо так, чтобы сажи получалось как можно больше. Сажа — необходимый компонент при изготовлении резины из каучука. Специальным образом приготовленный аморфный углерод широко используется для поглощения (адсорбции) многих веществ и как основа для нанесения катализаторов.

Графит очень нужен людям не только для карандашей. Порошок графита — хорошая смазка для трущихся частей машин. Из графита делают электроды для различных электрических устройств, потому что графит хорошо проводит электрический ток, и это, пожалуй, единственный пример хорошей электропроводности среди неметаллов.

Азот и кислород составляют 99% атмосферы нашей планеты (78% — азот и 21% — кислород). Галогены встречаются в природе в виде различных соединений, и это понятно — ведь они очень активны. Но кислород тоже очень активный неметалл. Как же это совместить с большим количеством свободного кислорода в природе? Нет ли здесь какого-то противоречия?

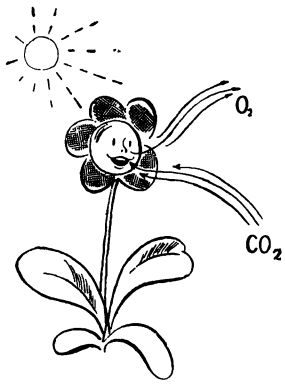



Рис. 12. Растения, используя энергию солнечных лучей, усваивают углекислый газ и обогащают атмосферу кислородом.

Все дело в огромной роли, которую играют в химии Земли растения. Это они — действующие «фабрики» — производят кислород. Если бы вдруг в один совсем не прекрасный день весь растительный мир перестал существовать, количество кислорода немедленно начало бы уменьшаться, а через 3000 лет в атмосфере совсем не осталось бы кислорода... И все же высокая химическая активность кислорода сказывается на его судьбе. Количество **свободного** кислорода $10^{15}$ *т*, т. е. 1 миллион миллиардов тонн. В соединениях с другими элементами его содержится в 10 000 раз больше.

Без кислорода нет дыхания, а без дыхания нет жизни. Но значение кислорода для жизни не ограничивается только этим. Из двух аллотропных видоизменений кислорода — «обычного» кислорода $O_2$ и озона $O_3$ — устойчивой является именно первая форма. Озон довольно быстро превращается в «обычный» кислород, если не успевает вступать в реакцию с другими веществами. Солнце могло бы стать причиной гибели всего живого, потому что, кроме благодатного тепла и света, оно посылает на Землю разящий поток губительных ультрафиолетовых лучей. И защищает нас от этого врага невидимое кислородное «одеяло»: на большой высоте ультрафиолетовые лучи встречаются с молекулами кислорода, «разбивают» их и превращают в молекулы озона. Образовавшийся озон и задерживает смертоносное излучение Солнца.

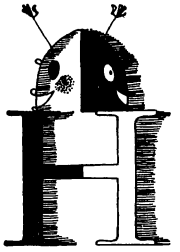
О кислороде обычно говорят: «газ без цвета, без запаха, без вкуса». Это верно, но лишь для привычных нам условий. Если обычный воздух охладить ниже —150° под давлением в 40 *атм*, он превращается в бесцветную жидкость. Если такую жидкость поместить в специальные сосуды с двойными стенками из зеркального стекла, между которыми выкачан воздух, то жидкий воздух медленно испаряется, причем легче улетучивается азот. Поэтому в конце концов в сосуде останется чистый жидкий кислород. Оказывается, жидкий кислород совсем не бесцветный, а голубой... Его помещают под давлением в стальные баллоны и используют там, где это необходимо. А необходимость в кислороде большая. Для выплавки чугуна, например, в домну вдувают воздух, необходимый для сгорания топлива. Но необходим-то только кислород, а азот активно мешает процессу, уносит тепло, ухудшает качество металла. Поэтому в доменном процессе очень перспективно применение чистого кислорода. Жидкий кислород используют в качестве окислителя топлива в некоторых системах космических ракет.

Азот — «безжизненный» газ, как его назвали когда-то (он не поддерживает горения и дыхания),— интересный неметалл. Молекула $N_2$ очень прочна, поэтому азот с трудом вступает в реакции. Свободный азот — самая устойчивая форма существования этого элемента в природе. Значительная часть азота на Земле

## Двуликий элемент

**В пределах каждого периода происходит переход от элементов-металлов к элементам-неметаллам и затем к инертному газу. Но в первом периоде перед инертным газом гелием находится лишь один элемент — водород. Это исключительный случай. Потому и элемент очень необычен, своеобразен. По физическим свойствам он очень похож на неметаллы — галогены. Реагируя с некоторыми металлами, например с литием, водород проявляет, как и галогены, валентность —1. Значит, водород — неметалл? Но, соединяясь со всеми остальными неметаллами, водород проявляет валентность +1, отдавая электрон. В таком состоянии он способен образовать ионы $H^+$. В этом водород похож на металлы. Вот почему водород часто помещают и в I и в VII группу периодической системы.**

**«Окись водорода» — вода при диссоциации дает не только ионы водорода $H^+$ (как положено кислоте), но и ионы $OH^-$ (как положено основанию). Это ли не амфотерность? Итак, в известном смысле водород — и металл, и неметалл, и «пограничный элемент» одновременно.**



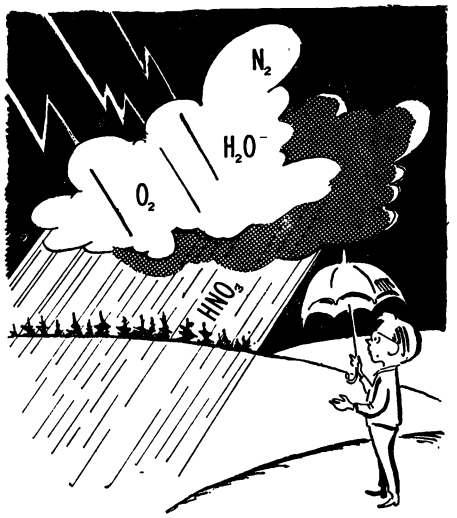



**Рис. 13. Грозовые разряды заставляют азот воздуха вступить в соединение с кислородом. Растворяя окислы азота, дождевая вода превращается... в азотную кислоту.**

находится именно в атмосфере, а те сравнительно небольшие скопления соединений азота, которые есть на Земле, обязаны своим происхождением в основном живым организмам.

Мы уже знаем, что растения освобождают кислород и выделяют его в атмосферу. С азотом дело обстоит как раз наоборот: живые организмы **связывают** азот атмосферы. Подсчитано, что так называемые азотобактерии, живущие в почве, способны за год связать 50 *кг* азота на каждом гектаре Земли. Бактерии же, обитающие на корнях бобовых растений, перерабатывают втрое больше атмосферного азота в расчете на 1 *га*! Есть бактерии, «работающие» в обратном направлении,— они возвращают связанный в соли азотной кислоты элемент опять в атмосферу.

При электрических разрядах в атмосфере во время грозы азот вступает в соединение с кислородом и в конце концов превращается в азотную кислоту. Потоки азотной кислоты, льющиеся на землю с грозовым дождем! Не слишком ли это преувеличено? Судите сами: в среднем на всех материках происходит более 40 000 гроз в день, и эти грозы приносят ежегодно около 15 *кг* связанного азота на 1 *га* земной поверхности.

В наше время в судьбу азота активно вмешался человек. Еще 140 лет назад первую партию чилийской селитры — одного из важнейших азотных удобрений — выбросили в море ... за ненадобностью. Сегодня на сотнях заводов превращают атмосферный азот в химические соединения, без которых невозможна ни современная промышленность, ни сельскохозяйственное производство.

Один из методов связывания атмосферного азота подражает природе: смесь азота и кислорода пропускают через электрическую дугу и получают окисел NO, который далее легко реагирует с кислородом воздуха, превращаясь в бурый $NO_2$. При растворении в воде он дает азотную кислоту. Этот метод сейчас отступает перед самым распространенным процессом — синтезом аммиака из смеси азота и водорода в присутствии катализатора:

$$N_2 + 3H_2 \rightleftarrows 2NH_3.$$

Если вы внимательно читали эту главу, вы обязательно должны задать коварный вопрос: все процессы в природе должны вести к уменьшению энергии, все элементы должны находиться в своей самой устойчивой форме — «камень обязательно должен упасть»?.

Как же может случиться, что кислород находится не в устойчивой форме своих соединений, а в свободном состоянии; наоборот, почему же азот, максимально устойчивый в своем элементарном состоянии, все же превращается в различные соединения?

Частично мы уже ответили на этот вопрос, подчеркнув роль живых организмов в судьбе этих двух элементов. Да, «камень должен упасть», если он предоставлен самому себе. Но не требует доказательств тот очевидный факт, что любой из нас может взять этот упавший камень и поднять его обратно на гору. Для этого нужно лишь затратить энергию. Теперь ясно, почему растения способны произвести превращения, о которых мы рассказали: ведь они затрачивают энергию, которую получают от Солнца.

Подсчитано, что масса живого вещества на Земле составляет один грамм на каждый квадратный сантиметр поверхности. Много ли это? Много! Ведь только благодаря участию живых организмов в атмосфере появился свободный кислород, на суше и в морях образовались огромные залежи известняков, мела, фосфоритов, углей, нефти. Недаром эти минералы называют б и о л и т а м и. Растения вмешиваются в распределение элементов в земной коре, концентрируя одни из них, способствуя рассеиванию других. В течение года растения фиксируют 8,2 млрд. *т* азота и 184 млрд. *т* углерода. Не удивительно поэтому, что общий вес живых организмов в 2,5 раза превышает вес всего никеля, хрома, цинка, свинца и золота земной коры, вместе взятых.

## ХИМИЯ ЖИЗНИ — ЭТО ХИМИЯ НЕМЕТАЛЛОВ

На нашей планете существует около полумиллиона видов растений и свыше миллиона различных видов животных. И все они — от мельчайших одноклеточных водорослей до исполинских эвкалиптов, от бактерий до человека — состоят в своей основе из небольшого числа элементов-неметаллов, сочетание которых и составляет колоссальное многообразие органических соединений.

Почему именно из соединений неметаллов построены живые организмы? Конечно, потому, что неметаллы гораздо богаче металлов по своей реакционной способности. Ведь неметаллы способны проявлять как положительную, так и отрицательную валентность, способны давать соединения друг с другом. Ковалентные связи между неметаллами — наличие общих электронов — позволяют атомам оказывать гораздо более существенное влияние друг на друга, чем это возможно в ионных соединениях. Эти элементы так и называют «органогены». Вот они: углерод, водород, кислород, азот, сера, фосфор (значительно реже — галогены).

Почему именно эти неметаллы лежат в основе вещества живых организмов? Может быть, потому, что их много в земной коре? Да, но не это главное. Ведь кремния неизмеримо больше, чем углерода! Пожалуй, важное значение имеет большая подвижность органогенов и их соединений (кремний же легко превращается в наиболее устойчивое и малоподвижное соединение $SiO_2$). Но и этого мало. Все жизненно важные структуры в живом организме — белки, углеводы, нуклеиновые кислоты — это **высокополимерные** вещества, включающие в себя длинные цепочки атомов. Из всех же неметаллов лишь углерод способен образовывать цепи практически неограниченной длины.

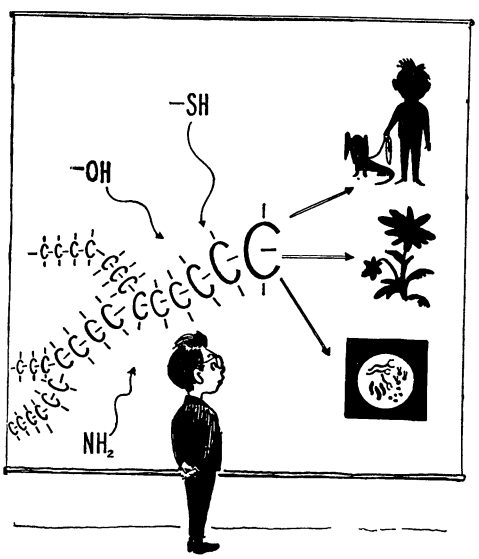



**Рис. 14. Жизнь во всех ее проявлениях на нашей планете связана с существованием органических веществ, в основе которых лежат углеродные цепи. Они связаны между собой «мостиками» из атомов азота, серы, кислорода. Все главные элементы жизни — углерод, водород, кислород, азот, сера, фосфор — неметаллы.**

И хотя известно много органических соединений, содержащих относительно небольшой процент углерода, именно этот неметалл лежит в основе органических веществ. Углеродный «скелет» — цепи или кольца атомов углерода, соединенных ковалентной, да к тому же неполярной связью,— составляет относительно устойчивую, консервативную часть органической молекулы. Подобно тому как наиболее частым «партнером» кремния является кислород, самым частым «соседом» углерода бывает водород. Поскольку его связь с углеродом малополярна, он также неохотно вступает в реакции. Остальные органогены, сочетаясь между собой, образуют полярные группы, замещающие некоторые из атомов водорода в молекулах органических веществ. Такие ф у н к ц и о н а л ь н ы е группы образуют активную часть молекул, а разнообразие таких групп и их сочетаний ведет к огромному разнообразию химических превращений, к которым способны органические вещества. Итак, сама жизнь во всех ее формах — могучий гимн неметаллам.

Но, проанализировав состав вещества растений, мы обязательно найдем в них, кроме неметаллов — органогенов, еще и калий, кальций, железо, магний. Содержание металлов здесь сравнительно невелико. Но отсутствие в почве ничтожных количеств меди и цинка или других микроэлементов резко сказывается на развитии растений. Для нормальной жизни растению необходимо около 70 элементов. Металлы входят в состав важнейших ферментов и витаминов, регулирующих жизнь животного организма (см. цв. табл. к стр. 433).

Железа в крови человека совсем немного — из него, пожалуй, и гвоздя-то не сделаешь, но попробуйте обойтись без него! Или попробуйте лишить скелет человека содержащегося в нем кальция!

В природе нет «лишних» элементов. Каждый из них занимает в ней определенное место и связан тысячами связей со своими близкими и далекими соседями по периодической системе.

# МЕТАЛЛЫ

## ЧТО ТАКОЕ МЕТАЛЛЫ

В периодической системе металлы преобладают (рис. 1). По многим свойствам металлы очень отличаются друг от друга: литий вдвое легче воды, а осмий тяжелее ее в 22,5 раза (рис. 2). Цезий или галлий можно расплавить в ладони, а вольфраму для плавления нужна температура лишь вдвое меньше, чем температура поверхности Солнца; литий, натрий или калий можно резать ножом, а чистый хром не всякий резец возьмет... Различна и химическая активность металлов — от почти полной химической инертности золота или платины до неукротимой реакционной способности калия или натрия.

Но, несмотря на все свое разнообразие, эти элементы образуют единую семью, потому что все они относительно легко расстаются со своими наружными электронами и превращаются в положительно заряженные ионы.

Элемент легко отдает электроны, если их в наружном слое мало (поэтому элементы первых трех групп, не считая бора,— металлы) или если радиус атома так велик, что ядро не в состоянии прочно удерживать наружные электроны (поэтому висмут, атом которого имеет в

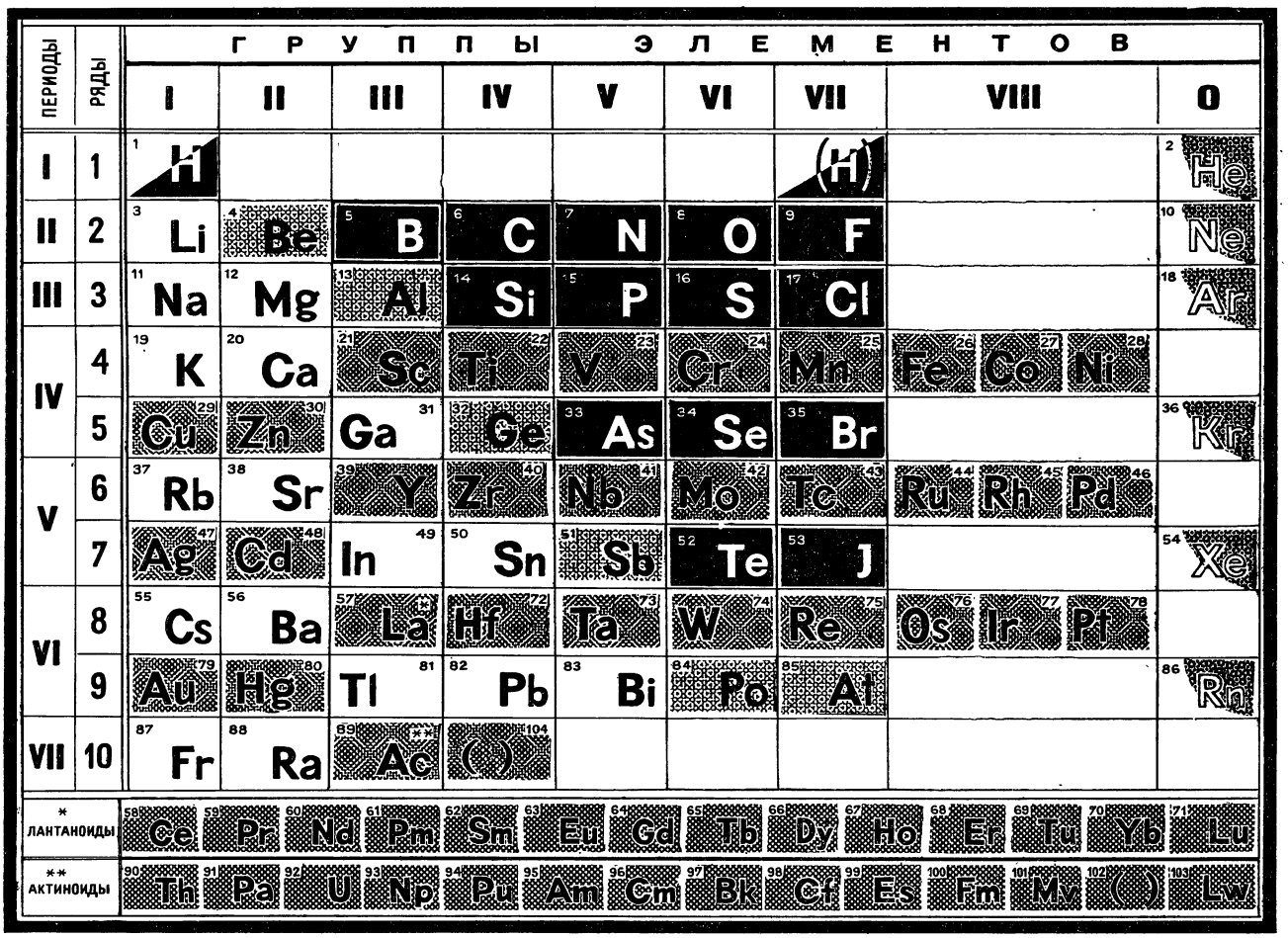



Рис. 1.

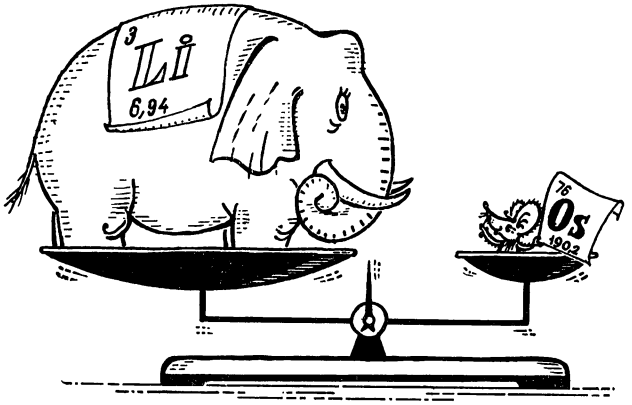



**Рис. 2. Литий вдвое легче воды, осмий тяжелее ее в 22,5 раза.**

наружном слое пять электронов, все-таки относят к металлам).

Проследив, как изменяются свойства у элементов III периода, мы увидим, что с увеличением числа электронов в наружном слое атомов элементы постепенно переходят от активного металла натрия к активному неметаллу хлору. IV период тоже начинается активным металлом калием. В конце этого периода перед инертным газом криптоном также стоит активный неметалл бром. Следовательно, и в этом периоде должен происходить такой же переход.

Почему же этот переход такой медленный? Дело в том, что у элементов IV периода от скандия до цинка «достраивается» не наружный электронный слой, а предыдущий (рис. 3). И лишь после цинка (начиная с галлия) число электронов в наружном слое увеличивается, так что у германия здесь четыре электрона. Он — «пограничный» элемент, за которым следуют неметаллы.

Поскольку у элементов от скандия до никеля в наружном слое не больше двух электронов, то они — металлы. Каждый большой период включает в себя подобный ряд, состоящий только из металлов. У этих рядов четные номера (4, 6, 8, 10), а из большинства расположенных в них металлов состоят **побочные** подгруппы периодической системы. Металлы, стоящие в середине больших периодов и последовательно «достраивающие» не наружный, а более глубоко лежащие электронные слои, называют п е р е х о д н ы м и  м е т а л л а м и.

Переходные металлы, как правило, проявляют переменную валентность, и потому их соединения гораздо многочисленнее и разнообразнее, чем соединения металлов главных подгрупп периодической системы.

Так, ванадий способен, вступая в химические реакции, отдавать один за другим все пять своих валентных электронов, изменяя свою валентность от $+2$ до $+5$. Интересно, что при этом получаются соединения красивой окраски, характерной для каждой из этих валентностей.

Максимальная валентность переходных металлов равна номеру группы. Правда, у большинства элементов VIII группы валентность ниже максимальной (см. ст. «Великий закон»). Проявляя максимальную валентность, металлы побочных подгрупп в своих соединениях становятся похожими на соседей из главных подгрупп. Так, семивалентный марганец входит в состав марганцевой кислоты $HMnO_4$, похожей по строению молекулы на хлорную кислоту $HClO_4$.

Если металл проявляет переменную валентность, то окислам высшей валентности отвечают к и с л о т ы, низшей — о с н о в а н и я. Окислы, в которых валентность металла промежуточна, а м ф о т е р н ы, т. е. способны в зависимости от условий проявлять как кислотные, так и основные свойства.

## КОГДА МЕТАЛЛЫ ПОХОЖИ ДРУГ НА ДРУГА

Мы привыкли к тому, что у элементов одной и той же главной подгруппы и у соединений

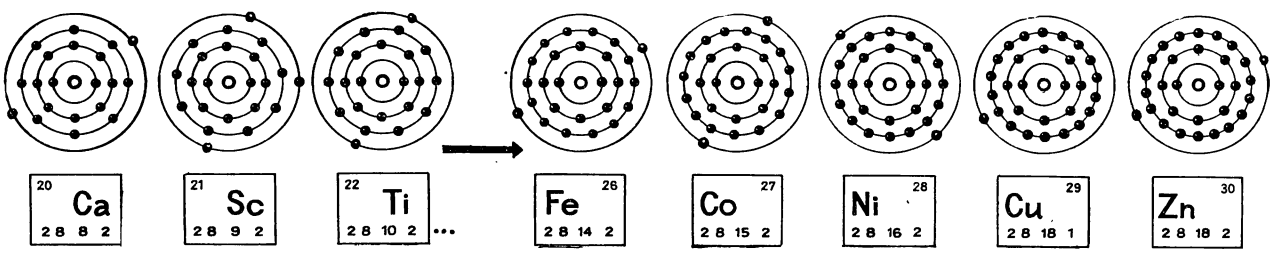



**Рис. 3.**

этих элементов сходные свойства. Причины такого сходства — похожая структура внешней электронной оболочки. Такая закономерность полностью относится и к металлам.

Но **переходные** металлы обнаруживают и новую особенность: ведь за несколькими исключениями, у всех у них в наружном слое по два электрона, и все они отличаются друг от друга лишь структурой второй (или третьей) снаружи оболочки.

Особенно близки свойства у металлов с почти завершенной предпоследней оболочкой, например у железа, кобальта и никеля. Поэтому такие «триады» элементов помещают вместе в VIII группу. Сходство этих металлов не ограничивается «своей» группой: следующий за никелем элемент медь хоть и попадает в I группу, но во многом подобен своим предшественникам. Особенно заметно такое сходство между «триадой» — осмий, иридий, платина — и золотом.

Особое сходство у двух замечательных пар — ниобий и тантал, цирконий и гафний — связано не только с одинаковой структурой внешних электронных оболочек, но и с одинаковым радиусом у атомов каждой пары.

У семейства лантаноидов различия электронной структуры «спрятаны» уже не во втором, а в третьем снаружи электронном слое. Вот почему это семейство помещают вместе в одну клетку периодической системы.

## ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ АКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛА

**Активный** металл **легко отдает** свои электроны, вступая в химическую реакцию. Сравнить активность нескольких металлов часто помогает всемогущая периодическая система.

Вот четыре металла-соседа. Нам известна их электронная структура (рис. 4).

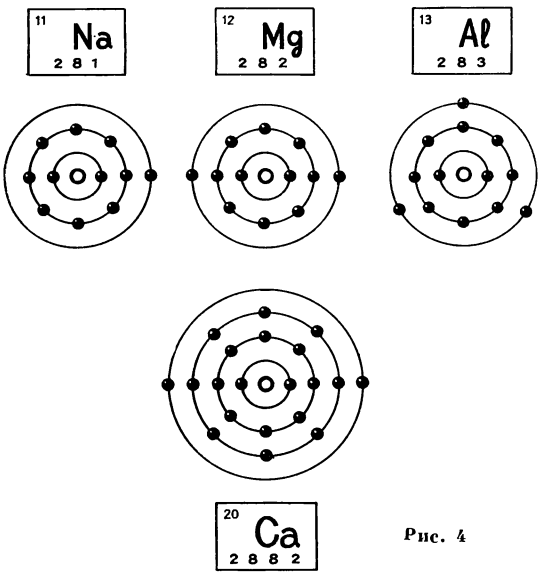



Рис. 4

Вступить в реакцию для перечисленных металлов означает отдать наружные электроны. Натрий отдаст легче один электрон, чем магний — два или алюминий — три. Поэтому от натрия к алюминию активность металлов уменьшается. Два наружных электрона у кальция дальше от ядра, чем такие же два электрона у магния. Поэтому кальций легче потеряет их, а это и значит, что активность кальция выше, чем магния.

Когда речь идет о металлах, стоящих в главных подгруппах периодической системы, можно довольно точно теоретически предсказать, какова будет их относительная активность: чем н и ж е и л е в е е место металла в системе, тем он а к т и в н е е. Не нужно, однако, забывать, что активность связана и с тем «партнером», с которым взаимодействует металл.

Относительную активность всех остальных металлов теоретически предвидеть гораздо труднее. Здесь на помощь приходит опыт, эксперимент. Простейший опыт может проделать каждый: опустите железный гвоздь в пробирку с раствором медного купороса, очень быстро железо покроется золотистым слоем металлической меди. Что произошло? Ионы меди, чтобы превратиться в металлическую медь, должны вернуть себе два электрона:

$$Cu^{+2} + 2e \rightarrow Cu^{\circ}.$$

Эти электроны и дают меди металлическое железо:

$$Fe^{\circ} - 2e \rightarrow Fe^{+2}.$$

Но если железо расстается со своими электронами, а медь включает их в свою электронную оболочку, то это и значит, что железо активнее.

Более сложные и точные эксперименты помогли выстроить металлы в одну шеренгу по их активности:

K Na Mg Al Mn Zn Fe Ni Sn Pb **H** Cu Hg Ag

Почему в этот ряд попал водород? Он имеет на это право потому, что водород по своему химическому характеру во многих реакциях ведет себя как металл (см. ст. «Неметаллы»).

Кроме того, один из важнейших признаков, характеризующих металлы,— это отношение к разбавленным кислотам, в которых металлы, стоящие слева от водорода, растворяются, становясь на его место.

А может ли водород вытеснять стоящие справа от него металлы из растворов их солей? Да, может. Газообразный водород под давлением способен замещать малоактивные металлы.

Чем левее стоит металл в таком ряду активности, тем легче он вступает в химические реакции, отдавая электроны.

Вот мы бросили в чашку с водой кусочек металлического натрия. Блестящий шарик бегает по поверхности воды, шипя и потрескивая. То и дело вспыхивает желтый огонек, сердито разбрызгивая во все стороны образовавшийся раствор щелочи. А если кусочек металла взять побольше, то дело может кончиться взрывом!

Магний в ряду активностей стоит правее натрия, он реагирует с водой лишь при нагревании.

Если же наблюдать взаимодействие железа с водой, то потребуются, пожалуй, недели, а то и месяцы, пока появятся видимые изменения: ржавчина на поверхности железа и совсем небольшое количество водорода, которое можно собрать над водой. Поэтому химик назовет железо сравнительно неактивным металлом. А инженер-технолог с ним не согласится, да еще, пожалуй, и поругает железо за его излишнюю готовность вступать в реакции. Прав каждый по-своему. И наверно, стоит посочувствовать технологам: ведь они-то хорошо знают, что более 10% всего добываемого ежегодно железа приносится в жертву воде, кислотам и другим веществам-агрессорам.

А поскольку железо, его сплавы с другими металлами и сами эти металлы — важнейшие конструкционные материалы, без которых невозможна современная техника, то ясно, что проблема химической устойчивости выдвигается на самое первое место.

## КАК ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ СВЯЗАНО С ИХ СВОЙСТВАМИ

Металлы мы узнаем среди других веществ по их особому **металлическому блеску.** Блестят они потому, что отражают падающие на них лучи света: не пропускают сквозь себя, как стекло, и почти не поглощают, как сажа. Это общее свойство металлов. Но ярче всего оно проявляется у серебра. Вот почему его применяют для изготовления зеркал, иногда, впрочем, его заменяют алюминием или индием.

Такое же общее свойство металлов — **электропроводность.** Без металлов невозможно было бы передавать по проводам электрическую энергию на тысячи километров или разговаривать по телефону. Здесь на первом месте среди металлов оказывается опять серебро и вплотную к нему примыкают медь и алюминий. Вот почему электропровода делают из чистой меди и алюминия.

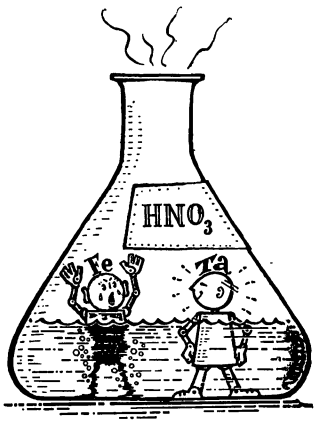



**Рис. 5. Железо растворяется в азотной кислоте, а тантал по отношению к ней удивительно стоек.**

Нить накала электролампочки раскаляется за счет сопротивления, оказываемого ею электрическому току, поэтому для изготовления ее, наоборот, нужен металл со сравнительно малой электропроводностью, но очень тугоплавкий. Таких металлов много, но из них выбран самый тугоплавкий — вольфрам. Нити из большинства других металлов при включении электролампочки либо мгновенно плавились бы, либо в короткий срок испарялись.

Но почему же из вольфрама не делают спиралей для электроплиток? Это было бы грубой ошибкой. Не только потому, что вольфрам слишком дорогой металл, но и потому, что он выдерживает длительное накаливание только в вакууме или инертном газе. На воздухе же он быстро окисляется.

Итак, новое назначение требует нового, специально для него приспособленного металлического материала. Вот тут-то и приходят на помощь сплавы.

## СВОЙСТВА СПЛАВОВ И ИХ СОСТАВ

Современная техника нуждается в металлических материалах с самыми разнообразными свойствами и сочетаниями свойств. Химия и металлургия должны обеспечить ее всем необходимым. Рассмотрим, как наука и техника решают эту задачу.

Металлический сплав для типографского шрифта, которым отпечатана эта книга, должен быть достаточно легкоплавким, чтобы из него

легко было отлить литеры, и в то же время достаточно твердым — иначе литеры износятся прежде, чем будет отпечатан весь тираж. При этом металл должен точно воспроизводить форму, в которой отливаются литеры. Среди чистых металлов нет такого, в котором сочетались бы все заданные свойства. Свинец легкоплавок, но слишком мягок, его можно царапать даже ногтем. Сурьма легкоплавка и достаточно тверда, но слишком хрупка.

Сплав же свинца с сурьмой и незначительным количеством олова обладает плавкостью свинца и твердостью сурьмы, но не хрупок, как она. В момент затвердевания этот сплав слегка расширяется и поэтому точно воспроизводит форму, в которой отлит. Вся эта сумма свойств, а не каждое в отдельности и делает наш сплав — гарт — почти незаменимым типографским металлом.

Не подумайте, что при сплавлении металлов их свойства просто складываются или же что свойства сплавов представляют что-то среднее между свойствами сплавленных металлов. Гарт, например, плавится при более низкой температуре, чем каждый из входящих в него металлов. Еще более легкоплавки припои; они соединяют, спаивают металлические части. А ведь припой состоит из тех же самых металлов — свинца, олова и сурьмы. Так, простейший из припоев — третник (одна треть свинца и две трети олова) плавится при 183°, в то время как точка плавления свинца 327°, олова 232°. Особенно легкоплавки сплавы висмута, хотя сам он плавится лишь при 271°. Из висмутового сплава (точка плавления всего 60°) изготовляют кольца, удерживающие пробки в водопроводной сети, проложенной по потолку здания. При возникновении пожара кольца плавятся, напор воды вышибает пробки и воде открывается путь к огню. Такую сеть устраивают в театрах, на складах горючих материалов, на деревообделочных и текстильных предприятиях.

Сплавляя одни и те же металлы, но в разной пропорции, можно получить сплавы с разными свойствами и разного назначения.

Корпус ручных часов чаще всего изготовляют из нержавеющей стали, а пружину — уж обязательно из элинвара. И то и другое — сплавы железа с хромом, никелем и углеродом. Но в состав нержавеющей стали входит 18% Cr, 8% Ni, а в состав элинвара — 12% Cr, 36%Ni.

Каждый день, заводя часы, вы закручиваете часовую пружину. Заведенная пружина раскручивается, тянет шестеренки-колесики — часы идут. Многие годы и изо дня в день, 365 раз в году скручивается и раскручивается пружина, не утрачивая упругости.

При другом соотношении тех же составных частей, например 15% Cr, 60% Ni, получается нихром — сплав с низкой электропроводностью и высокой жаропрочностью. Он применяется в электронагревательных устройствах (например, в электроплитках).

Сплав того же железа с 48% Ni обладает одинаковым со стеклом и платиной коэффициентом расширения при нагревании. Это платинит. Без платинитовой проволочки, впаянной в стеклянную оболочку электролампочки, нельзя было бы подвести ток к нити накала, так как другие металлические материалы при изменении температуры расширяются либо больше, либо меньше, чем стекло, и сцепление металла со стеклом нарушается.

Состав, свойства и назначение сплавов чрезвычайно разнообразны. Но в современной технике чаще всего применяют сплавы, в основе которых самый дешевый и доступный металл— железо.

## ЧЕМ ЧУГУНЫ ОТЛИЧАЮТСЯ ОТ СТАЛЕЙ

Железа добывают из недр земли больше, чем любого другого металла. Но чистое железо вы вряд ли видели. Этот серебристый металл слишком мягок, а поэтому малопригоден для технических изделий (за исключением сердечников электромагнитов).

Сплавы железа — ч у г у н ы и с т а л и — очень отличаются друг от друга своими свойствами. Как ни старайтесь, вам не удастся согнуть чугунный стержень, при большом усилии он не выдержит — сломается, но не согнется. Лезвие же стального обеденного ножа сгибается и снова выпрямляется. Чугун хрупок, а сталь упруга. Впрочем, упругость стали имеет свой предел: лезвие ножа нельзя согнуть в дугу—оно сломается.

Металлурги изготовляют сотни разнообразных сортов («марок») стали, десятки сортов чугуна. Во всех непременно содержится углерод. Поэтому и сталь и чугун называют железоуглеродистыми сплавами.

В чугунах более 2% углерода, в сталях — менее 2%, и совсем мало его в мягких сталях, в ковком железе. Из ковкого железа прокатывают листы кровельного железа, протягивают проволоку, из железной проволоки изготовляют гвозди.

Огромная отрасль промышленности, которая занята получением чугуна, сталей и ковкого железа, называется черной металлургией, а сами железоуглеродистые сплавы — черными сплавами (см. т. 5 ДЭ, ст. «Черная металлургия»).

## КАКИЕ БЫВАЮТ ЧУГУНЫ

Если железную проволоку нагревать электрическим током, то сначала она все более провисает — от нагревания железо расширяется. При 769° проволока перестает притягиваться магнитом. А при 910° проволока внезапно натягивается: объем железа уменьшается. При этой температуре расположение атомов в железе изменяется и обыкновенное железо, или альфа-железо (рис. 6), превращается в гамма-железо (рис. 7). Одно из отличий гамма-железа в том, что оно способно науглероживаться: оно впитывает в себя углерод, как губка воду, пока не насытится им. Наконец, при 1539° железо плавится, превращаясь в подвижную, легко расплескивающуюся жидкость. Жидкое железо более жадно поглощает углерод, чем твердое гамма-железо.

Железо выплавляют из его руд с помощью кокса. Он как раз и представляет собой почти чистый углерод. Поэтому ослепительно блестящая струя, с шумом извергающаяся из лётки доменной печи в ковш,— это не чистое железо, а раствор углерода в жидком железе — чугун.

При затвердевании жидкого чугуна в нем образуются кристаллы железа. Но эти кристаллы не в состоянии удержать в себе весь растворенный углерод. Его излишек выделяется в виде графита — получается серый чугун.

В отливке из серого чугуна кристаллы железа переслоены тонкими и широкими чешуйками графита. На рисунке 8 показано, как выглядит срез серого чугуна под микроскопом. Рассекающие срез во всех направлениях тонкие, словно трещинки, полоски — это и есть пластинки графита. Графитовые чешуйки легко расщепляются, как спрессованная стопка бумаги. Поэтому графит — «слабое» место в сером чугуне. При ударе отливка из серого чугуна разбивается на куски вдоль прослоек графита, как если бы эти прослойки были в самом деле трещинами. Такой чугун хорошо отливается в формы, но хрупок, и его нельзя ковать. Из серого чугуна отливают станины машин, маховые колеса, плиты, канализационные трубы.

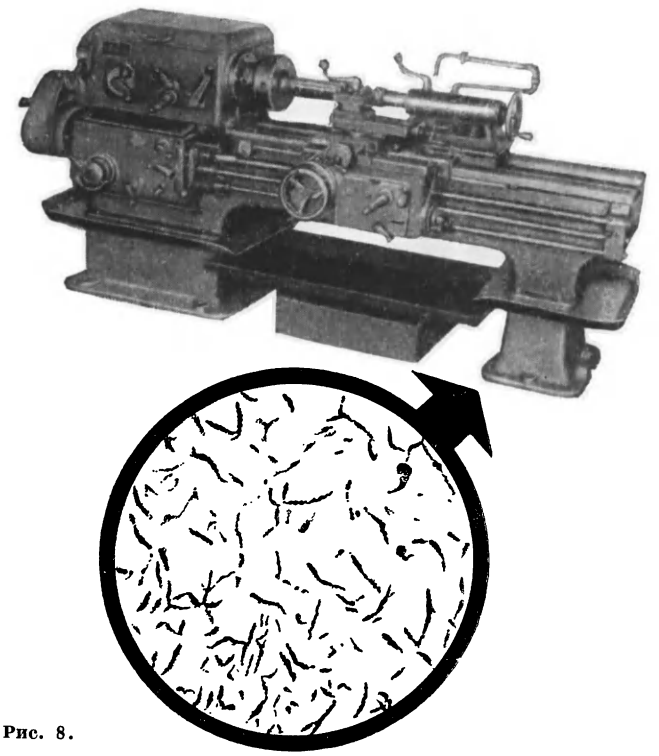


Рис. 8.

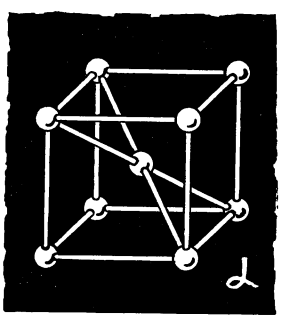



Рис. 6.

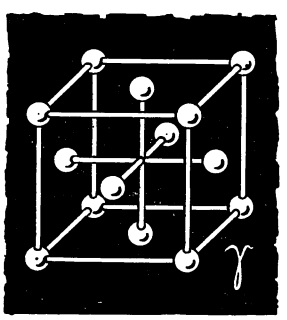



Рис. 7.

На рисунке 9 показана отшлифованная поверхность высокопрочного чугуна под микроскопом. Такой чугун получен в СССР. Графит не рассекает отливку тонкими пластинками, он «блокирован» в виде включений шарообразной формы. Это достигнуто тем, что в расплавленный чугун перед его разливкой в формы введено незначительное количество магния. Из высокопрочного чугуна можно поэтому отливать и такие ответственные детали, как, например, коленчатый вал мощного судового двигателя.

На примере высокопрочного чугуна мы познакомились еще с одним из способов изменять по заказу свойства сплавов — с применением

модификаторов. При модифицировании химический состав сплава не меняется: ведь высокопрочный чугун по составу практически ничем не отличается от обыкновенного. Изменяются лишь форма, размеры и расположение кристаллов тех веществ, из которых сплав образован.

## КАК ЗАКАЛЯЕТСЯ И ОТПУСКАЕТСЯ СТАЛЬ

Большая часть выплавляемого в доменных печах чугуна переделывается в сталь. Для этого из расплавленного чугуна выжигают углерод, пока его останется не более 2%.

Для каждого стального изделия нужно подобрать подходящий сорт стали. Так, железнодорожные колеса изготовляют из мягкой, а поэтому вязкой стали, их ободья (бандажи)— из более твердой стали, так как иначе при трении о рельсы колеса быстро изотрутся. Для осей, на которые насажены колеса, сталь нужна еще более твердая.

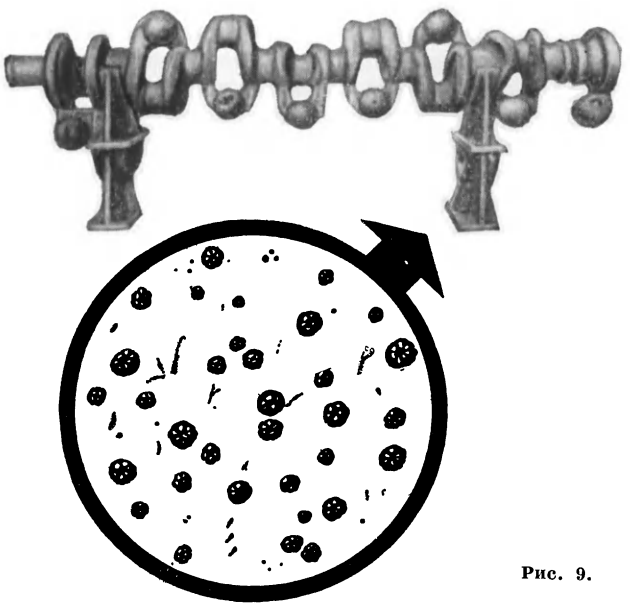


Рис. 9.

Твердость стали придает содержащийся в ней углерод. Но вот что получилось при забивании трех гвоздей в твердое дерево: один сломался при первом же ударе, второй затупился, согнулся, и шляпка его расплющилась. И только третий послушно вошел в дерево. А между тем все три гвоздя изготовлены из одной и той же стали, с одним и тем же содержанием углерода. В чем же здесь секрет? Дело в том, что гвозди прошли разную термическую обработку.

Двигателем в наших часах служит пружина. Раскручиваясь, пружина приводит в действие весь сложный механизм часов. Но если пружину перекрутить, она сломается. Такая сталь обладает упругостью и хрупкостью. Первое свойство наряду с твердостью делает сталь почти незаменимым поделочным материалом. Со вторым же свойством поневоле приходится мириться.

Эти свойства стальное изделие получает во время закалки. Для закалки его нагревают, не давая расплавиться, и тем самым дают возможность атомам углерода проникнуть в его кристаллы.

Если теперь изделие медленно охладить, в нем произойдет то же, что в затвердевающем чугуне: железо освободится от растворенного в нем углерода, перейдя в альфа-железо.

Проделайте эту операцию со стальным пером, иглой или кусочком стальной проволоки, и вы убедитесь, что материал неузнаваемо изменился. Он легко сгибается, не ломаясь, и не возвращается к первоначальной форме. Упругость и твердость, а вместе с ними хрупкость утрачены. Вновь нагрейте докрасна этот предмет, но охладите его быстро, бросив в холодную воду. В результате сталь останется твердой, упругой и хрупкой.

При закалке стального изделия атомы углерода из-за быстроты охлаждения не успевают выделиться из кристаллов альфа-железа. Эти «застрявшие» атомы и придают закаленной стали особые свойства.

В закаленном состоянии сталь получает наивысшую твердость, но становится такой же хрупкой, как чугун. Чтобы сделать ее менее хрупкой, изделие подвергается последней операции — отпуску. Предмет еще раз нагревают до сравнительно невысокой температуры. Так, стальные инструменты отпускаются при температурах всего 120—150°. При этом твердость стали почти не снижается, а хрупкость уменьшается. Для пружин и рессор сохранять высокую твердость не обязательно, поэтому их подвергают отпуску при более высоких температурах (300—400°); при значительной потере твердости достигается наибольшая упругость.

## ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Быстро вращается сверло сверлильного станка, вонзаясь в стальную плиту. Разумеется,

сверло при этом сильно нагревается. Что из этого следует?

Сталь остается твердой и упругой лишь до тех пор, пока она закалена, т. е. пока углерод остается растворенным в железе. Но при нагревании закалка стали исчезает и сверло должно стать мягким. Резцы и сверла из обыкновенной стали не выдерживают значительного нагревания при работе. Здесь на помощь приходит вольфрам — тот самый металл, из которого изготовлена нить электролампочки. Добавка вольфрама к стали при ее выплавке позволяет углероду удерживаться в твердом растворе вплоть до температуры красного каления. Так делают быстрорежущую инструментальную сталь.

Применяя резцы из такой стали, можно сильно увеличить скорость резания металла и в несколько раз повысить производительность металлообрабатывающих станков. Быстрорежущая сталь относится к сталям легированным, т. е. содержащим, помимо углерода, добавочные элементы.

Применения стали весьма разнообразны — от стального пера до реактивного самолета. В каждом случае к ней предъявляются различные требования. Многие из них металлург может удовлетворить, усложняя состав стали теми или иными легирующими элементами. И только когда эти возможности полностью исчерпаны, он отказывается от стали и обращается к другим сплавам. Так, по заказу металлообрабатывающей промышленности был создан победит — безжелезный сверхтвердый сплав из кобальта и карбида вольфрама. Сверхтвердые сплавы позволили еще более увеличить скорость резания металлов — до десятков метров в секунду.

## В ТЕХНИКУ ПРИХОДЯТ НОВЫЕ МЕТАЛЛЫ

В течение веков человек не испытывал нужды в больших количествах других металлов, кроме железа. В XIX в. распространение машин вызвало стремительный рост производства чугуна и особенно стали. Вместе с тем появились и совершенно новые потребители металлов — электротехника, а в XX в.— авиация. Начался быстрый рост производства меди для электропромышленности. Для авиации потребовались другие металлы — прочные, как сталь, но не в пример ей легкие. Химия с помощью электропромышленности доставила такой материал. Это был алюминий.

Первые слитки алюминия, появившиеся в конце прошлого столетия на промышленной выставке под рекламным названием «серебро из глины», поразили воображение посетителей. Люди привыкли к большому удельному весу металлов и не хотели верить, что здесь нет никакого фокуса, что слитки не полые внутри. В будущее нового металла было еще трудно поверить, так как цена у него была почти такая же, как у золота. Когда химический способ получения алюминия заменили электролитическим, цены на алюминий стали стремительно падать. Вскоре новый металл оказался доступным для самого широкого применения, но, конечно, опять-таки не в чистом виде.

Чистый алюминий мягок и податлив в значительно большей степени, чем чистое железо. Однако, сплавляя алюминий с небольшими количествами других металлов, получили алюминиевые сплавы, жесткие, прочные, упругие, приближающиеся этими качествами к сталям, при плотности в среднем почти втрое меньшей.

### Фотографическая «специальность» железа

**Некоторые соединения железа светочувствительны. Фотолюбители могут попробовать получить отпечатки с негативов, если их не пугает необычный синий цвет отпечатков. Для этого готовят рабочий раствор, смешивая 10 частей 25%-ного раствора щавелевокислого железа с 7 частями концентрированного раствора аммиака и 20 частями насыщенного раствора щавелевой кислоты. При этом образуется комплексная соль железа и аммония, обладающая светочувствительностью. Отдельно готовят 25%-ный раствор красной кровяной соли. Перед работой оба рабочих раствора смешивают равными долями и полученным раствором смачивают обыкновенную бумагу. Высушенную бумагу следует экспонировать, но выдержка должна быть значительно длительнее, чем при работе с обычными фотобумагами. Проявителем служит обычная вода. Вместо фиксирования снимок просто высушивают. Отпечатки можно получить и на ткани. Для этого к светочувствительному раствору нужно добавить желатин и полученный густой раствор наносить на ткань. Если обесцветить готовый отпечаток в растворе соды, а затем опустить его в раствор таннина, получается коричневый отпечаток, в растворе галловой кислоты — черный.**

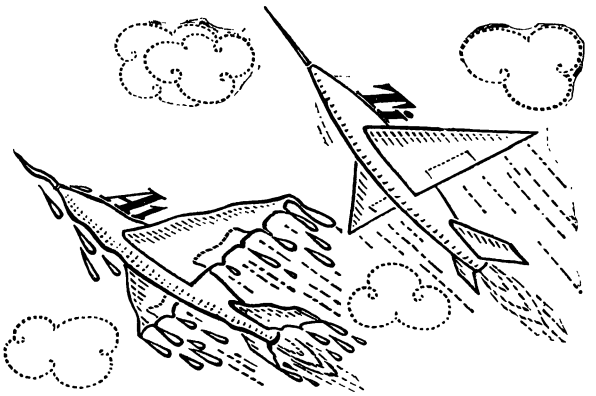


**Рис. 10. Алюминий не выдержал экзамена на «тепловой барьер».**

У алюминия есть достоинство, всем известное из повседневного опыта: стойкость к природным агрессорам — воздуху и воде. Между тем химики причисляют алюминий к самым химически активным металлам. Как вяжется одно с другим?

Оказывается, при первом же соприкосновении с воздухом алюминий, окисляясь, покрывается тончайшей пленкой своего очень прочного нелетучего и нерастворимого в воде и кислотах окисла $Al_2O_3$. Эта пленка преграждает доступ кислороду и другим веществам-агрессорам к поверхности металла и играет роль маски, скрывающей подлинное химическое «лицо» алюминия.

Если снять защитную пленку, например счистить ее напильником под слоем ртути, то алюминий становится неузнаваемым, или, если хотите, «самим собой». Ведь при этом алюминий, не успев «залечить раны», т. е. образовать новую пленку, лишен защиты. Дело в том, что на амальгамированной, покрытой ртутью поверхности пленка окисла не удерживается, отслаивается. Если бросить такой «очищенный» алюминий в воду, он будет энергично вытеснять из нее водород.

Пленку окиси алюминия, защищающую металл от коррозии, можно «усилить» так называемым а н о д и р о в а н и е м. Если при электролизе разбавленного раствора серной кислоты в качестве анода взять алюминий, то его поверхность окисляется за счет выделяющегося при электролизе кислорода. Толщина «брони» $Al_2O_3$ при этом может составлять 0,15 *мм*, в то время как в обычных условиях пленка окисла на поверхности металла имеет толщину лишь 0,00001 *мм*.

В качестве нового конструкционного легкого металла соперником алюминия выступил другой металл — м а г н и й. Его плотность всего 1,7. У сплавов магния она лишь немногим выше — около 1,8, а по механическим свойствам магниевые сплавы приближаются к алюминиевым сплавам и к сталям. Конструкторы считают, что если какие-то части из алюминиевых сплавов заменить равноценными по прочности деталями из сплавов магния, то конструкция облегчится примерно на 25—30%. Но далеко не всегда такая замена возможна. Магний уступает алюминию в пластичности, а главное, он более подвержен химическому разрушению (коррозии) из-за сравнительно плохого качества его защитной пленки.

## ОТ АЛЮМИНИЯ К ТИТАНУ

Казалось, что авиация обеспечена легкими и прочными конструкционными материалами. Но авиация вступила в новый этап. Преодолев «звуковой барьер», она вырвалась на просторы сверхзвуковых скоростей и натолкнулась на новый барьер — «тепловой». При скоростях, в несколько раз превышающих скорость звука, возникает сильное трение обшивки летательного аппарата о воздух. Обшивка сильно разогревается. Точки плавления обоих «крылатых» металлов — алюминия и магния — не так уж низки, около 650°. Но прочность металлов сильно снижается при нагревании задолго до плавления металла. И алюминий с магнием не выдержали экзамена на «тепловой барьер»; запас их прочности оказался исчерпанным. И опять встал вопрос о новом металле, достаточно легком и вместе с тем способном выдержать сильный нагрев без значительного снижения прочности.

В наши дни таким металлом оказался т и т а н. Он имеет не такую уж малую плотность — 4,5. Однако это искупается чрезвычайной прочностью металла и его сплавов, и, главное, точка плавления титана более чем на 1000° выше, чем у магния, и «тепловой барьер» для него значительно более высок.

К тому же титан не подвержен разрушительному действию даже морской воды — самой агрессивной к металлам природной среды. Пластинку из титана извлекали из морской воды после многолетнего пребывания в ней такой же блестящей, не поврежденной коррозией, какой она была при погружении. Ни сталь, ни алюминиевые сплавы не выдержали

бы такого испытания. Поэтому титан оказался счастливой находкой не только для авиации, но и для судостроения.

## СТАРОСТЬ И МОЛОДОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Давайте поставим перед собой такой вопрос: почему алюминий — металл замечательный своими свойствами — люди по-настоящему используют лишь примерно 40 лет, титан — около 20 лет, а железо служит людям не менее восьми тысячелетий?

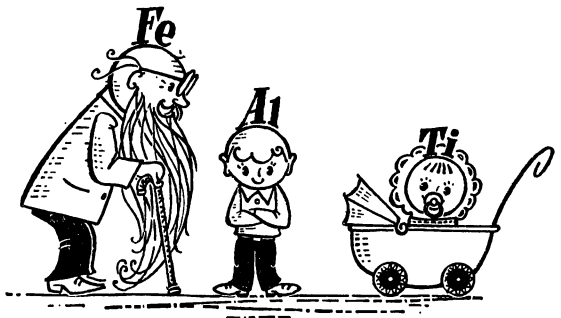



Рис. 11.

Может быть, алюминия на земном шаре мало? Нет. Его почти вдвое больше, чем железа. Правда, основная масса алюминия входит в состав алюмосиликатов, где относительное содержание алюминия не очень велико.

Выделить железо из руды удается сравнительно просто — обжигом руды с углем. В бокситах же, главном сырье алюминия, кислород крепче удерживает алюминий. Поэтому только электролиз при большой затрате энергии позволил освободить серебристый металл. Ясно, что лишь двадцатый век — век электричества — мог стать веком алюминия.

Нынешний соперник железа — титан в 1910 г. имелся в научных лабораториях в количестве нескольких граммов. В 1947 г. за рубежом было выплавлено 2 *т* этого металла. А спустя 13 лет производство поднялось до 350 тыс. *т*. Понятно, что новые металлы вызваны к жизни растущими требованиями техники. Но эти требования взаимны.

Чтобы титан во всю свою мощь начал работать в промышленности, необходимо было научиться выделять его из руды.

Вот как это делается сегодня. Минерал титана — рутил восстанавливают углеродом в присутствии хлора:

$$TiO_2 + C + 2Cl_2 \rightarrow CO_2 + TiCl_4.$$

Затем действием металлического магния отнимают хлор и получают титан в виде губчатой массы:

$$TiCl_4 + 2Mg \rightarrow Ti + 2MgCl_2.$$

Теперь нужно металл переплавить. Чтобы не дать ему при этом вступить в реакцию с азотом и кислородом воздуха, процесс ведут или в вакууме, или в атмосфере инертного газа аргона.

Надо было создать аппаратуру, устойчивую к действию хлора; применить в промышленных масштабах вакуум и организовать получение больших количеств аргона. Лет тридцать назад о решении таких задач нельзя было даже мечтать.

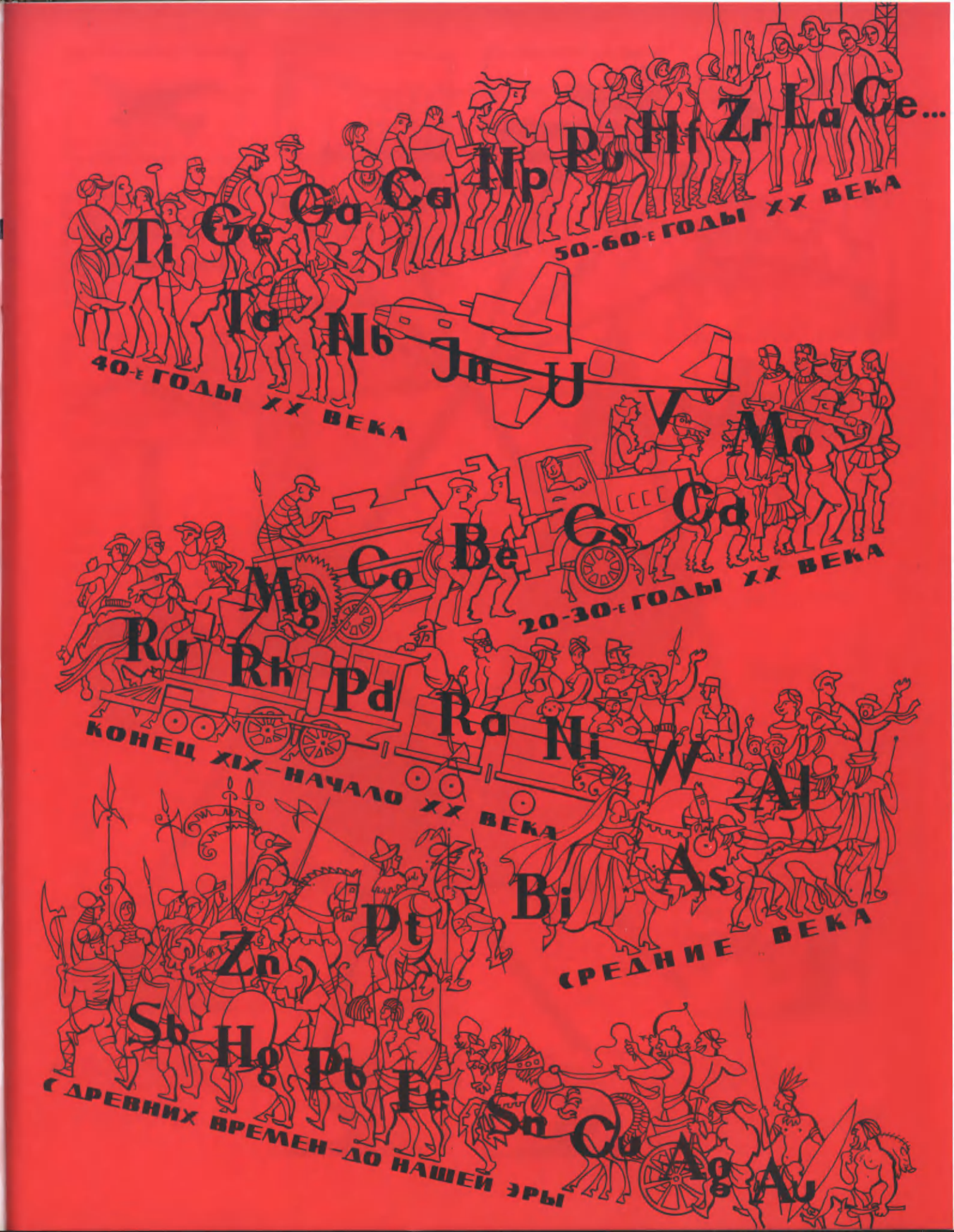
Титан взлетел на крыльях сверхзвуковых скоростных самолетов. Но ведь ракеты мчатся еще стремительнее, непрерывно растут скорости станков, турбин, все более жестким испытаниям подвергаются материалы новой техники. И главное испытание — огнем. Начинаются новые поиски. А что, если испытать в работе соседей титана по периодической системе?

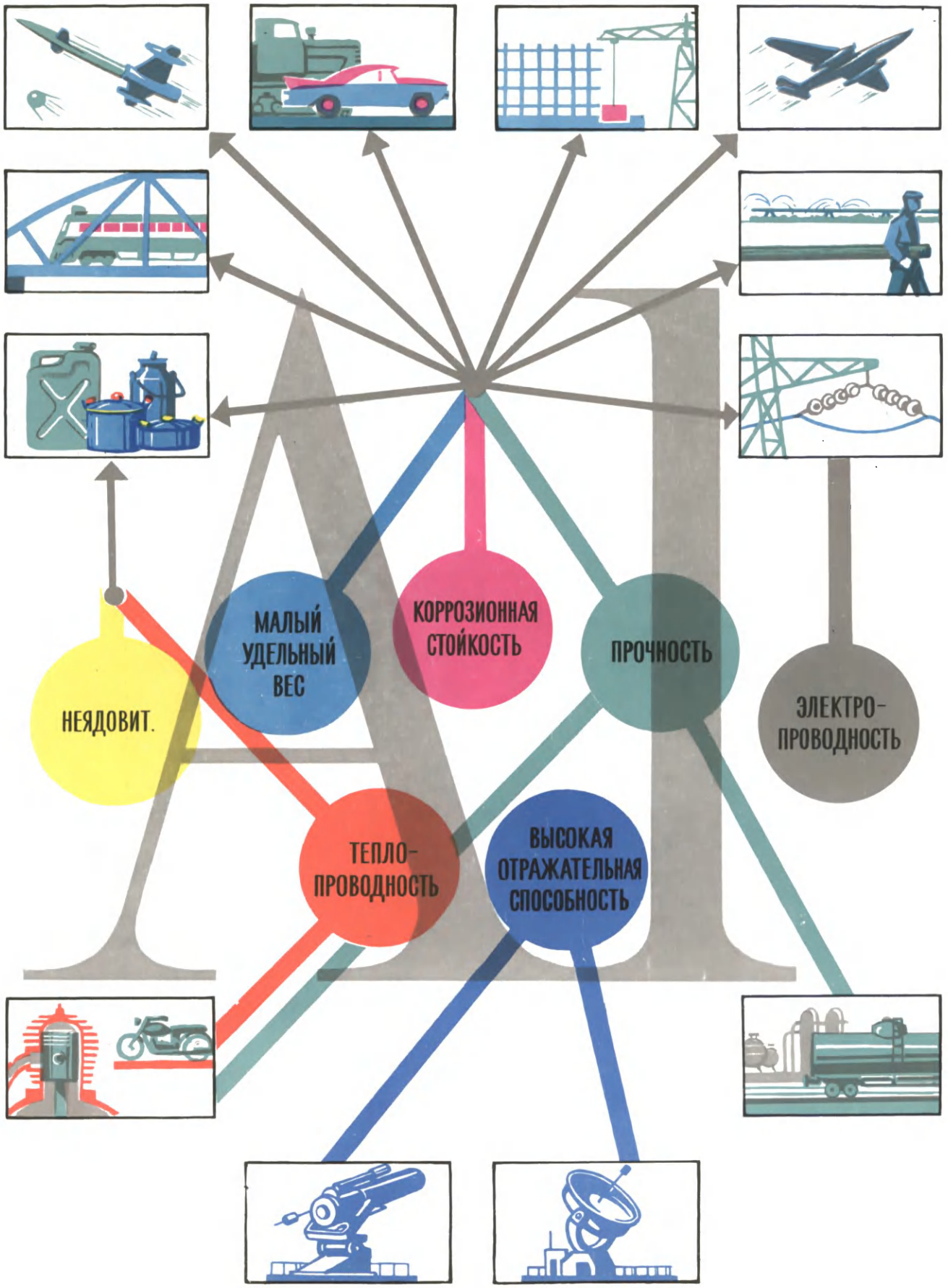
## КТО СЛЕДУЮЩИЙ?

Среди металлов известно несколько особо тугоплавких (рис. 12). Самые тугоплавкие металлы сгруппированы в периодической системе довольно компактно (рис. 13). Из них хром, молибден и вольфрам сравнительно давно используются в металлургии для легирования сталей. Технология этих металлов сейчас хорошо известна. Но вот беда: молибден и вольфрам при высокой температуре окисляются. Впрочем, может быть, это не беда, а полбеды? Ведь окисел алюминия или хрома, образовавшийся на поверхности металла, служит надежной броней, защищающей металл от дальнейшего окисления.

*Таблица к статье «Металлы»*

**Восхождение человечества к вершинам современной науки и техники неразрывно связано с использованием металлов. Железо, золото, медь, олово, свинец, серебро были знакомы людям с глубокой древности. Сначала медленно, ощупью, наугад люди ставили себе на службу металлы и их соединения. До начала XIX в. в обиходе людей появилось около 20 металлов и их соединений, за 100 следующих лет — до начала нашего века — число «работающих» металлов увеличилось еще на 15. XX век стал веком алюминия, сплавов, содержащих ванадий и вольфрам, молибден и кобальт, магний и цирконий, веком титана. Век атомной энергии не мог не стать веком урана, тория, плутония. Все шире используются бериллий, ниобий, тантал, цирконий, гафний, редкоземельные элементы.**


Ti Ge Ga Ca Np Pu Hf Zr La Ce...
50-60-Е ГОДЫ XX ВЕКА
Ta Nb Jr U
40-Е ГОДЫ XX ВЕКА
V Mo
Be Cs Ca
20-30-Е ГОДЫ XX ВЕКА
Mg Co
Ru Rh Pd Ra Ni W Al
КОНЕЦ XIX – НАЧАЛО XX ВЕКА
Bi As
Pt
Zn
СРЕДНИЕ ВЕКА
Sb Hg Pb Fe Sn Cu Ag Au
С ДРЕВНИХ ВРЕМЕН – ДО НАШЕЙ ЭРЫ


МАЛЫЙ УДЕЛЬНЫЙ ВЕС
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ
ПРОЧНОСТЬ
НЕЯДОВИТ.
ЭЛЕКТРО-ПРОВОДНОСТЬ
ТЕПЛО-ПРОВОДНОСТЬ
ВЫСОКАЯ ОТРАЖАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

К сожалению, окислы молибдена и вольфрама **летучи**, поэтому металлы при нагревании на воздухе буквально тают. Кроме того, вольфрам очень тяжел.

Есть много оснований считать, что наиболее перспективные металлы будущего — ниобий вместе со своим близнецом — танталом.

Оба эти металла еще более стойки к коррозии, чем титан. Правда, и ниобий и тантал при высокой температуре окисляются. Но сплав этих двух металлов отличается повышенной устойчивостью к окислению.

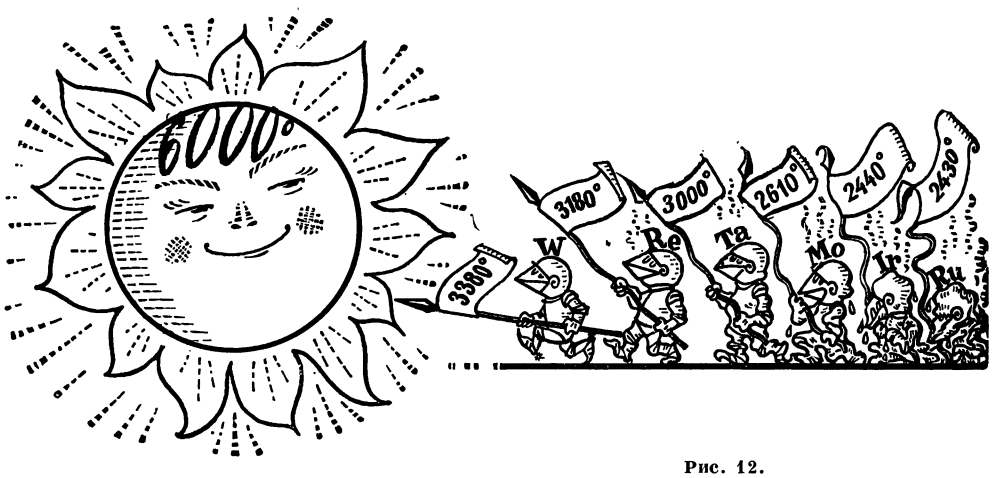



Рис. 12.

Очень интересна история редких металлов-близнецов — циркония и гафния. Они всегда встречаются в природе вместе, но в течение полутораста лет никто об этом не подозревал, настолько похожи химические свойства этих металлов. Примесь гафния, как тень, всюду следовала за цирконием, вступая в те же реакции, что и «главный» металл.

Эта близость становится понятной, если учесть, что оба «близнеца» имеют одинаковую структуру внешних электронных оболочек и совершенно одинаковый радиус атомов.

Отделить цирконий от гафния очень трудно. Но ведь технологические свойства обоих металлов одинаково хороши, поэтому оба металла использовали совместно. В самом деле, имеет ли смысл разделять «близнецов», желая затем получить их карбиды, если один из этих карбидов плавится при 3550°, а другой — при 3887°?

И все-таки пришлось научиться разлучать неразлучных. Этого настоятельно потребовала еще одна новейшая отрасль техники — атомная промышленность. Цирконий оказался хорошим материалом для оболочки урановых стержней — сердца атомного реактора. Важно здесь не только то, что цирконий прекрасно сопротивляется коррозии, но и то, что он почти не поглощает нейтронов. А гафний, наоборот, жадно поглощает нейтроны. Ведь это свойство связано не со строением электронных оболочек, а со структурой атомного ядра. А она-то у этих «близнецов» различна!

Развитие атомной энергетики заставило организовать в больших промышленных масштабах получение таких ранее почти не использовавшихся металлов, как ниобий, тантал, иттрий, бериллий.

## ЧТО ТАКОЕ «РЕДКИЕ» МЕТАЛЛЫ

Обычное понимание слова «редкий» подсказывает нам, что, по-видимому, это металлы, которых в природе мало. Но это не так. «Редкий» металл бериллий распространен в природе больше, чем всем известная ртуть, а «редкого» молибдена лишь в полтора раза меньше, чем обычного свинца. Значит, дело не только в распространенности. Относя тот или иной металл к разряду «редких», приходится учиты-

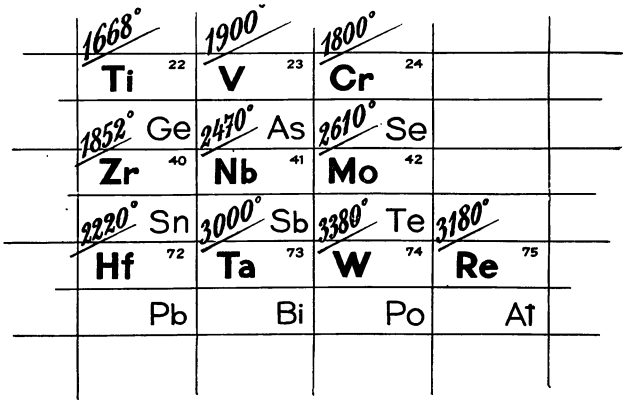



Рис. 13.

*Таблица к статье «Металлы»*

**Ценные технологические свойства, практически неисчерпаемые запасы в природе делают алюминий металлом сегодняшнего и завтрашнего дня.**

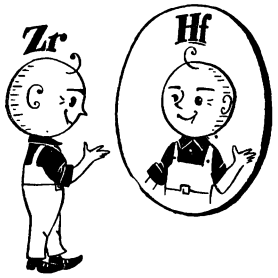



**Рис. 14. Редкие металлы-близнецы — цирконий и гафний — имеют одинаковую структуру внешних электронных оболочек и совершенно одинаковый радиус атомов; поэтому они так похожи друг на друга.**

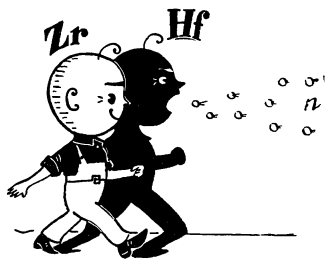



**Рис. 15. Цирконий почти не поглощает нейтронов, а гафний, наоборот, жадно их глотает.**

вать, встречается ли этот металл в значительных скоплениях минералов, легко ли его выделить из этих минералов, нужен ли он сегодняшней технике в чистом виде или в соединениях.

Ясно, что различие между «редкими» и «обычными» металлами очень условно. Вспомните, как быстро стал обычным металлом еще сравнительно недавно «редкий» алюминий, как стремительно уходит из семьи «редких» титан. На очереди бериллий, цирконий, тантал, ниобий...

Но есть ряд элементов, в отношении которых все ученые единодушно голосуют за название «редкие»: галлий, германий, таллий, индий, рений... Эти металлы почти не имеют своих минералов, не образуют собственных месторождений, а встречаются в природе лишь как незначительная примесь к рудам других металлов. Добывают их также в незначительных количествах.

Та их особенность, что они встречаются почти повсеместно, хотя и в ничтожных количествах, отражена в другом «титуле» — рассеянные элементы. Трудно прибрать к рукам рассеянные элементы, но сделать это становится настоятельной необходимостью. И прежде всего это касается германия.

## ЭЛЕМЕНТ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ

Вплоть до тридцатых годов учебники писали о предсказанном Менделеевым и открытом Винклером г е р м а н и и довольно единодушно: «практического применения не имеет».

Виной тому было своеобразие промежуточного положения германия в периодической системе: от неметаллов он как будто ушел, а к металлам не пришел — не проводник и не изолятор, тверд, но хрупок. Как будто ничего интересного.

Сейчас германий — важнейший элемент полупроводниковой техники. Но трудно найти другой пример, когда на пути исследователей стояло бы столько, казалось бы, непреодолимых трудностей. В земной коре германия содержится лишь вдвое меньше, чем свинца. Однако для этого элемента слова «в земной коре» следует понимать совершенно буквально: в ничтожных количествах он содержится во всех без исключения горных породах.

В результате долгих поисков удалось найти способ получать германий в качестве побочного продукта при переработке цинковых руд или, как это ни странно, из золы и сажи углеперерабатывающих заводов. Итак, источник германия был найден, но трудности только начинались.

Давно известно, что у каждого элемента только ему присущая температура плавления, теплопроводность и другие физические свойства.

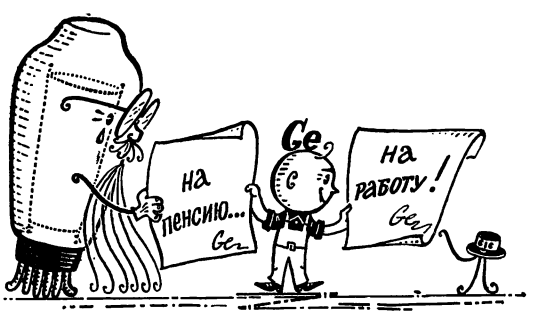



**Рис. 16. Германий стал важнейшим элементом полупроводниковой техники.**

Но германий никак не хотел подчиняться этому закону: электропроводность различных его образцов оказалась настолько различной, что это приводило исследователей в отчаяние.

Выяснилось, что все дело было в незначительных п р и м е с я х, которые содержались в металле и коренным образом сказывались на его свойствах.

Как нельзя лучше к германию подходят меткие слова А. Е. Ферсмана: «Истинные законы — великие законы природы — обычно на-

чинаются за третьим десятичным знаком — в тонких мелочах строения». Добавим к этому, что за 6—7-м десятичным знаком начинаются чудеса — те чудеса, которые входят сегодня в наш быт миниатюрными приемниками и телевизорами, а в науку и технику — великолепными приборами... Но чтобы эти чудеса стали возможными, пришлось научиться очищать германий до невероятной чистоты — 99,99999999%! Для этого не годился ни один из прежде известных методов очистки. Пришлось разрабатывать принципиально новые способы. Одним из таких способов, например, стала зонная плавка (см. ст. «Полупроводники»).

Сейчас в периодической системе почти не осталось элементов, которые не находят себе применения, и круг их «профессий» с каждым днем становится все шире. «Новые» металлы занимают прочные позиции в технике.

Исследования продолжаются, и, как знать, может быть, «старые», давно известные металлы еще откроют нам свои до сих пор неизвестные особенности, свойства. В наш век пластмассы приходят на смену металлам в таких областях, где еще вчера металлы считались незаменимыми,— в машиностроении. Но это не значит, что век металлов кончился. Металлы остаются незаменимыми всюду, где от материала требуется высокая электропроводность, высокая теплопроводность, высокая жаропрочность, соединенная с пластичностью. Пластмасс, способных длительно выдерживать температуру в сотни и тысячи градусов, мы еще не знаем. Современная наука и техника по-прежнему немыслимы без металлов. И машиностроение, и строительное дело, и транспорт, и атомные электростанции, и космические ракеты — все они нуждаются в металлах. Вот почему в наших планах развития народного хозяйства наряду с очень высокими темпами роста выпуска пластмасс предусматривается быстрое увеличение производства черных и особенно цветных металлов — алюминия, редких металлов и их жаропрочных сплавов.

■

# РЕДКИЕ ЗЕМЛИ

В 1964 г. исполнилось 170 лет со дня одного выдающегося события. Ни один календарь, ни одна статья в научном или популярном журнале не отметили этой даты. Но в исторической летописи науки 1794 год должен занимать почетное место.

Сто семьдесят лет назад финский химик Юхана Гадолин открыл новый элемент, который был назван иттрием. С него началась удивительная история не менее удивительного семейства элементов, которое раньше называли редкими землями, а теперь именуют редкоземельными элементами, или лантаноидами. Сам иттрий в это семейство не включают, однако по своим свойствам он близок редкоземельным элементам и в природе встречается вместе с ними.

Химики прошлого называли «землями» окислы некоторых элементов — кальция, магния, бария. Окислы тех элементов, о которых пойдет речь, обладали многими свойствами «земель». И, кроме того, их редко находили в природе. Отсюда и название «редкие земли».

В XIX в. редкие земли принесли ученым столько огорчений и разочарований, сколько не дали все остальные элементы, вместе взятые. Хорошо сказал об истории редких земель французский химик Жорж Урбэн: «Это было море ошибок, и истина в нем тонула...»

«Гроссмейстер химии» прошлого века швед Иенс Берцелиус в 1803 г. открыл вторую редкую землю — цериевую. Иттрий и церий встречались в одних и тех же минералах и были очень похожи друг на друга. Этот факт оказался своеобразным намеком на грядущие трудности, которые ждали исследователей редких земель. На деле иттрий и церий оказались смесями элементов.

В 1839 г. ученик Берцелиуса Карл Мосандер выделил из церия две новых «земли» — лантан и дидим. Через три года он нашел, что иттрий тоже смесь элементов. Тербий и эрбий пополнили список редких земель. В нем значилось теперь шесть представителей. И все они напоминали друг друга, словно братья-близнецы. Такого не было среди других известных элементов. Так родилась проблема редких земель — самая запутанная проблема неорганической химии.

Ученые по-разному пытались отличить их друг от друга. Но это оказалось очень трудно.

Ведь все они давали одинаковые химические реакции. Их пытались различать по окраске, но цвет их часто менялся в зависимости от способа получения и чистоты «земель». Пытались распознать иттрий по сладковатому вкусу его солей, но этот метод даже тогда вызывал у ученых усмешку.

Наступает 1860 г., и немецкие ученые Кирхгоф и Бунзен дают в руки исследователей чудесный способ анализа — спектральный анализ. Каждый элемент имеет свой характерный спектр, и с помощью этой «визитной карточки» любой элемент можно отличить на фоне других. Каждая редкая земля получила теперь свой опознавательный знак, и химики, которые изучали редкие земли, почувствовали, наконец, облегчение.

Но спектральный анализ оказался для науки о редкоземельных элементах чем-то вроде мифического троянского коня. В нем таилась опасность, о которой пока еще ученые и не подозревали.

Дмитрий Иванович Менделеев сразу почувствовал угрозу для своей периодической системы со стороны редких земель. Пока их было всего шесть. Слишком мало по сравнению с тем, сколько мы знаем их теперь. Слишком много для того, чтобы удачно разместить их в таблице Менделеева. Все они были трехвалентны, все стремились в третью группу системы, но она могла предоставить редким землям всего одно место. Менделеев думал, что пока они плохо изучены. И когда ученые лучше с ними познакомятся, каждая редкая земля получит свое отдельное место в таблице. А спустя тридцать пять лет автор периодического закона с огорчением писал, что в отношении редких земель его личное мнение ни на чем определенном не остановилось.

И не мудрено. Ибо с середины 70-х годов в области редких земель возникает то «море ошибок», о котором говорил Урбэн. Спектральный анализ оказался слишком капризным методом. Часто он обнаруживал истину там, где ее не было, новые элементы, даже когда их на деле не существовало. И все потому, что малейшие примеси других веществ искажали картину спектров. И, как в кривом зеркале, ученые видели не то, что было в действительности. Обратная сторона медали приносила беды исследованию редких земель.

За каких-то тридцать лет сто раз провозглашалось открытие новых редкоземельных элементов. И только восемь раз эти открытия не были ошибочными. Как снежный ком, росло число редких земель. Сколько их — десять, пятнадцать, двадцать — или им вообще нет числа? И все они похожи друг на друга. Если редкие земли в самом деле элементы, то как располагать их в таблице Менделеева? А может быть, эта таблица и неправильна. Лжеэлементы со звучными названиями — викторий и дагмарий, дециний и космий и многие другие — были словно пороховыми зарядами, грозившими подорвать стройное здание периодической системы.

И потребовался поистине титанический труд химиков, чтобы выловить истину из «моря ошибок». В начале XX в. химики установили, что в действительности существуют уже по крайней мере пятнадцать редких земель.

Это были наши старые знакомые лантан и церий, тербий и эрбий. Дидим оказался смесью элементов. В 1879 г. француз Лекок де Буабодран извлек из этой смеси первую «составляющую» — самарий, а через шесть лет австриец Ауэр фон Вельсбах разделил остаток на два новых элемента — неодим и празеодим. А от эрбия и тербия ученым удалось отделить неизвестные раньше элементы: от первого — гольмий, тулий и иттербий; от второго — диспрозий и лютеций. И в честь Гадолина одна из действительно открытых редких земель была названа гадолинием. Редкоземельным оказался также и европий.

Один представитель этого семейства — прометий — пока не обнаружен в земной коре. Ученые получают его искусственно, путем ядерного синтеза (см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов»).

Почему все редкоземельные элементы так похожи друг на друга? Ответ дали физики. Они показали, что две наружные электронные оболочки у атомов редкоземельных элементов устроены одинаково. А ведь химические свойства элементов как раз зависят от строения внешних электронных оболочек. Если оболочки одинаковы, то и химические свойства очень близки.

Своеобразие свойств редкоземельных элементов нашло отражение в периодической системе. Все пятнадцать элементов-близнецов (лантан и 14 лантаноидов — от церия до лютеция) помещают теперь в третью группу таблицы Менделеева, в клетку лантана (см. ст. «Великий закон»).

Когда редкоземельными элементами занялись геохимики, то обнаружилась любопытная вещь. Редкие земли оказались отнюдь не такими уже редкими, как это представлялось многим поколениям ученых. Судите сами: запасы ред-

коземельных элементов в земной коре в два раза превышают запасы олова, в 10 — свинца, в 320 — сурьмы, в 1600 — серебра, в 2500 раз — ртути и в 3200 раз — запасы золота. Словом, редкоземельного сырья в недрах нашей планеты достаточно много.

А как же они используются на практике?

Долгое время редкоземельные элементы, составляющие 20% всех известных на Земле металлов, оставались не у дел. Требования новой техники положили конец этому неоправданному забвению. Ныне трудно назвать область человеческой деятельности, где бы не участвовали редкоземельные элементы. Каждый год во многих странах устраиваются съезды и конференции, специально посвященные им. О них ежегодно выпускаются сотни научных статей и книг.

Редкоземельные металлы отличает высокая химическая активность. С другой стороны, они закипают при высоких температурах. Эти две особенности делают их всегда ценными добавками, входящими в различные стали и чугуны. Они легко входят в состав сплавов и удаляют из сталей вреднейшие примеси — серу, азот, кислород, фосфор. Тем самым значительно улучшаются качества сталей. Всего лишь десятые доли процента так называемого мишметалла (смешанного редкоземельного металла, состоящего в основном из церия) придают стали дополнительную жаропрочность, значительно облегчают ее обработку и делают ее гораздо более стойкой против коррозии.

Экономисты весьма удовлетворены тем эффектом, который произвело внедрение редкоземельных элементов в выплавку стали. Ученые недаром считают вмешательство редкоземельных металлов самым выдающимся успехом в сталеварении за последние 50 лет.

Содружество редкоземельных элементов с магнием сделало ценнейшие прочные магниевые сплавы еще более ценными. Резко подскочил температурный потолок службы сплавов на основе магния. Теперь эти сплавы, «усиленные» редкоземельными металлами, применяются для отливки деталей сверхзвуковых реактивных самолетов, управляемых снарядов и оболочек искусственных спутников Земли.

Широко применяют редкоземельные элементы в силикатной промышленности. Они сообщают стеклам самую разнообразную окраску. Они же придают стеклам высокую прозрачность, не позволяя им желтеть и мутнеть под действием ультрафиолетовых лучей солнца, рентгеновского или гамма-излучения, а на такие стекла современная техника предъявляет огромный спрос. Редкоземельные элементы используются при варке специальных оптических стекол, для астрономических и спектроскопических приборов. Сверхпрочные стекла, светочувствительные стекла, стекла с высокой электропроводностью, с большим показателем преломления — вот ассортимент изделий, которые не обходятся без редкоземельных добавок. А смесь редкоземельных окислов оказывается наилучшим абразивом (полирующим порошком) в весьма ответственном процессе полировки стекол. Уже появился термин: р е д к о з е м е л ь н а я к е р а м и к а. Она очень нужна при изготовлении специальной радиотехнической аппаратуры.

...Работает ядерный реактор, и безаварийность его работы обеспечивают редкоземельные элементы. Их роль заключается в следующем. От управляемой ядерной реакции до ядерного взрыва, образно говоря, один шаг. Как только количество свободных нейтронов превысит критическое значение, наступает мгновенное расщепление всего ядерного горючего. Нужны «тормоза» — специальные регулирующие стержни. Их задача — поглощать избыток свободных нейтронов. Редкоземельные элементы европий и гадолиний — великолепные поглотители. Их ядра поглощают нейтроны с жадностью, не свойственной другим элементам.

Редкоземельные элементы входят в состав керамических и огнеупорных материалов, применяемых в ядерных реакторах. Соли этих элементов участвуют в сложном технологическом процессе отделения плутония, накапливающегося при работе реактора, от оставшегося урана.

Радиоизотопы редкоземельных элементов, такие, как прометий-147, тулий-170, церий-144 и европий-150, занимают видное место среди применяемых на практике радиоактивных изотопов.

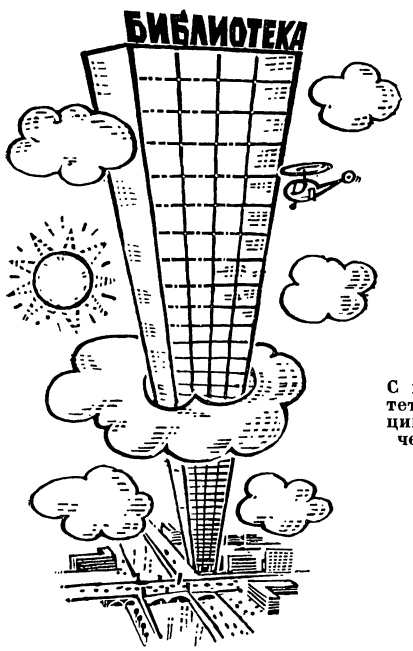
Редкоземельные элементы и их соединения — превосходные катализаторы. Эти элементы используются в радиотехнике и электронике, в медицине и пищевой промышленности, в текстильном и лакокрасочном деле... Практической деятельности редкоземельных элементов посвящаются ныне специальные большие книги. ■

# ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА ВОКРУГ НАС

## СКОЛЬКО ИХ?

Органических веществ в настоящее время известно около двух миллионов, и число это непрерывно растет. Каждый год синтезируют или открывают в природе свыше 90 тысяч новых органических соединений.

Десятки тысяч химиков органиков-синтетиков в тысячах лабораторий мира — в университетах, учебных институтах, колледжах, в высших технических школах, в научно-исследовательских институтах, в многочисленных химических лабораториях фабрик и заводов, в центральных лабораториях промышленных фирм — заняты изысканием новых органических веществ. Результаты этих работ публикуются в научных журналах, патентах и авторских свидетельствах на изобретения.



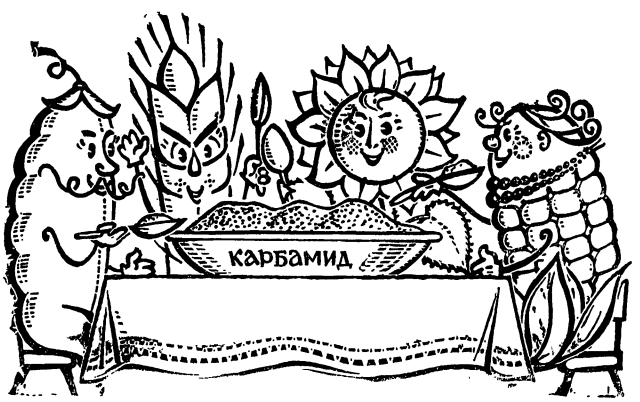

**С каждым годом растет поток информации о новых органических веществах.**

Огромный поток сведений о новых органических веществах ежегодно систематизируется в реферативных журналах, сводится в картотеки, в формульные и предметные указатели, заполняет справочники.

Известный справочник по органической химии, основатель которого русский академик Федор Федорович Бейльштейн, был издан в 1882 г. в двух больших томах. В нем содержались сведения обо всех известных тогда органических веществах. В наши дни немецкое химическое общество продолжает выпуск 4-го издания этого справочника. Выпущено уже более ста таких томов, а литература по органическим веществам охвачена только до 1949 г., и издание еще не закончено. Теперь уже ясно, что количество сведений о новых органических веществах возрастает так стремительно, что охватить их справочной литературой скоро станет невозможно. Химики-органики первые в науке предложили привлечь электронные вычислительные машины для «запоминания» справочных данных. Сейчас идут интенсивные исследования по конструированию и использованию электронных запоминающих машин.

Насколько это важно, видно из того, что уже сегодня годовой комплект реферативного журнала «Химия» занимает полку длиной в метр. Через десять лет это будет два метра, через двадцать — четыре, а через пятьдесят лет такой комплект займет 32 метра полок. Пользоваться такими справочниками станет невозможно. Среди информации по химии значительное место занимают сведения о новых органических веществах.

Новые органические вещества родятся в научных лабораториях; главная масса их так и не выходит из лабораторий. Однако многие вещества — тысячи и десятки тысяч — передаются на фабрики и заводы, где их изготовляют в очень больших количествах. Одни вещества,




как например органическое азотное удобрение карбамид, производятся на заводах в миллионах тонн, другие изготовляются совсем в не-

больших количествах — десятки или сотни килограммов в год. Но все они нужны, и органические вещества можно встретить всюду: на заводах и в колхозах, в больницах и на стадионах, в жилых домах и в палатках полярников, в библиотеках и в обсерваториях...

## ПОЧЕМУ ИХ ТАК МНОГО?

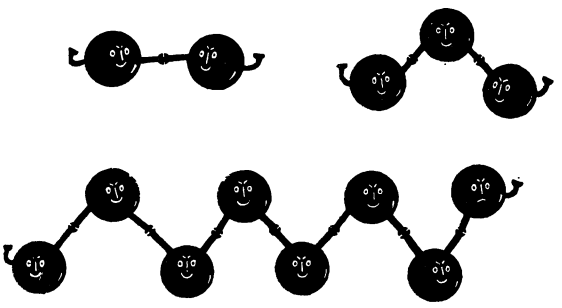
Органические вещества — это разнообразные соединения углерода с другими элементами, и прежде всего с водородом, кислородом, азотом, фосфором. Многообразие органических веществ — следствие особых свойств углерода, что и выделяет его среди всех других элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Углерод находится в четвертой группе периодической системы; во внешней электронной оболочке атома углерода четыре электрона, поэтому углерод четырехвалентен и легко образует прочные химические соединения как с элементами, легко отдающими свои валентные электроны (водород), так и с элементами, легко принимающими электроны в свою внешнюю валентную сферу (кислород или хлор).

Но одно это свойство не могло бы обеспечить все многообразие органических веществ, если бы не способность углерода соединяться... с самим собой и создавать таким образом цепи атомов. Эти цепи могут быть короткими — из двух, трех, четырех атомов, но могут быть и очень длинными — 100 000 атомов и больше. Например, молекулы некоторых видов полиэтилена содержат в среднем в цепи около 150 000 атомов углерода. Вещества с очень длинными цепями атомов называются полимерами (см. ст. «Полимеры»).

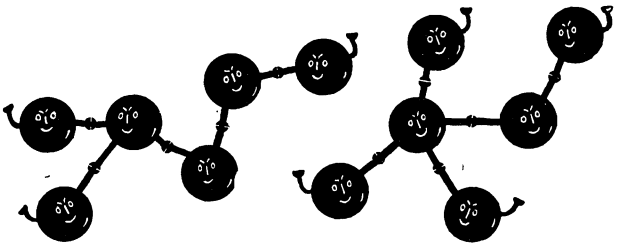
Цепи атомов углерода могут быть линейными (нормальными), в которых все атомы, соединенные в цепочку, расположены подряд, но могут быть и разветвленными; они могут образовывать кольца, сетки, разнообразные пространственные фигуры. Цепи могут составляться не только из атомов углерода, но в них могут включаться в разных местах атомы других элементов — кислорода, азота, серы. Разнообразие цепей, которое можно составить из атомов углерода и других элементов, поистине безгранично.

Однако это еще не все! Мы говорили только о цепях из атомов углерода, пусть с включением атомов других элементов. Но ведь при образовании цепи атом углерода использует только две свои валентности, а их у него четыре (лишь

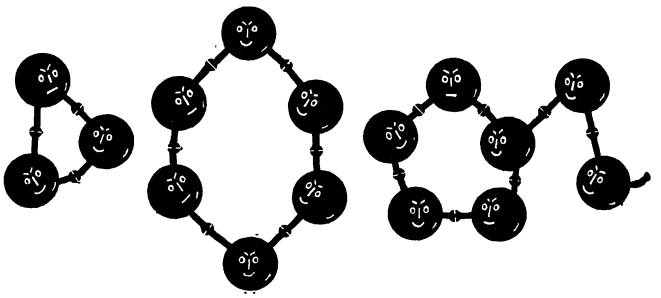
ЦЕПИ АТОМОВ УГЛЕРОДА:



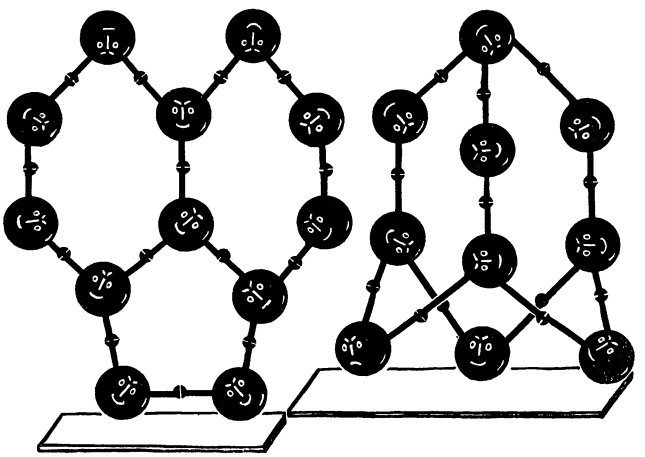
нормальные



разветвленные

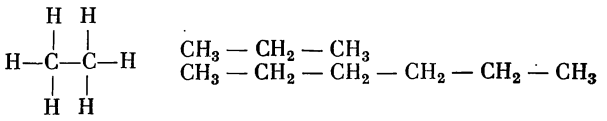


кольчатые (циклические)

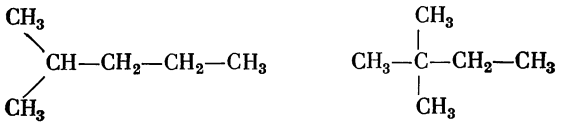


многокольчатые.

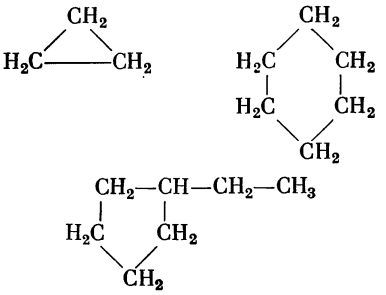
в местах разветвления цепей углерод использует три или даже все четыре валентности). В линейной цепи у каждого атома углерода остаются еще две валентности, а у атомов, расположенных с краю цепи, даже три валентности, которые могут быть использованы для соединения с атомами других элементов, прежде всего с атомами водорода. Тогда получаются разнообразные у г л е в о д о р о д ы:



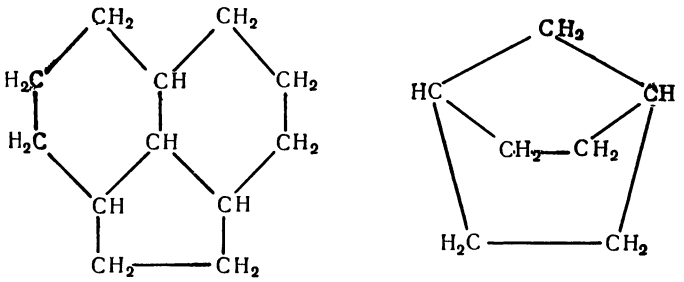
С нормальными цепями

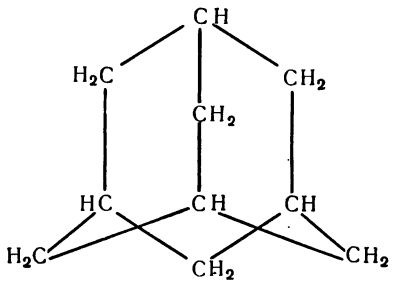


С разветвленными цепями



Кольчатые

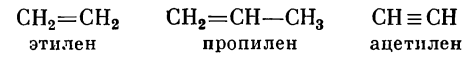




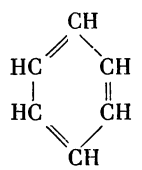
Многокольчатые

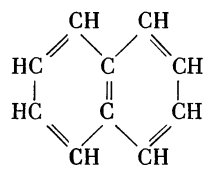
Вместо атомов водорода в различных местах цепей могут быть также атомы кислорода, азота, серы... Получаются разнообразные кислородные, азотистые, сернистые п р о и з в о д н ы е углеводородов. Таким образом, великое разнообразие цепей углеводородов, т. е. цепей из атомов углерода, обрамленных атомами водорода, еще умножается на великое разнообразие производных, которые различаются характером атомов, замещающих водород, и их расположением в цепи.

И это еще не все причины разнообразия органических веществ! Атомы углерода могут соединяться друг с другом не одной, а двумя или тремя валентностями. Тогда между ними возникают д в о й н ы е и т р о й н ы е с в я з и.




Эти кратные связи могут быть расположены в различных местах цепей или колец. В некоторых случаях при этом образуются особенно прочные группы атомов, как например в б е н з о л е, где шесть атомов углерода связаны 18 валентностями, образуя шесть так называемых а р о м а т и ч е с к и х связей (название «ароматический» сложилось исторически, так как некоторые представители этого класса соединений обладают приятным ароматом). Остальные шесть валентностей атомов углерода соединены с водородом. Часто (но неточно) бензол изображают с тремя простыми и тремя двойными связями между атомами углерода.




Наконец, разнообразие органических веществ увеличивается еще и оттого, что они могут различаться пространственным расположением атомов, как например двукольчатые углеводороды, так называемые *цис*-д е к а л и н и *транс*-д е к а л и н. Два шестичленных кольца в этих веществах соединены друг с другом по-разному, и пространственно эти молекулы сильно отличаются одна от другой.

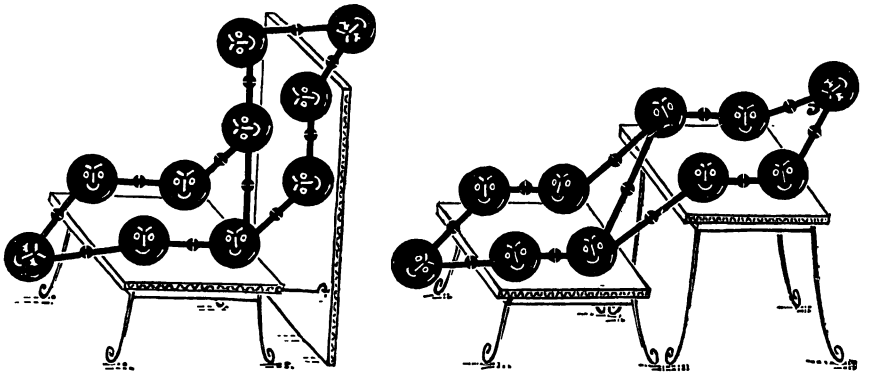
Количество органических веществ безгранично. Одних только разных углеводородов состава $C_{20}H_{42}$ может быть 366 319, и ясно, что те два миллиона органических соединений, которые нам известны сегодня,— это ничтожная

часть возможных, даже простых, органических соединений.

Вот мы ответили на вопрос, почему известно так много органических веществ. Ответ получился неожиданный. Известных нам органических веществ совсем немного, а возможное число их бесконечно. И надолго еще хватит работы химикам-органикам всего мира по созданию новых органических веществ.

Для чего же нужны органические вещества? Какую роль они играют в природе и зачем человечество неустанно умножает число известных органических веществ?

*Цис*-декалин и *транс*-декалин (справа).

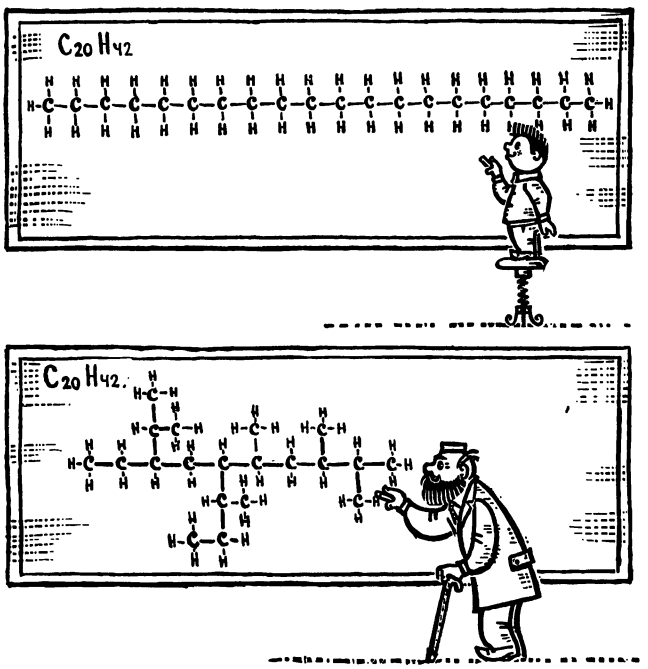


## ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА В ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

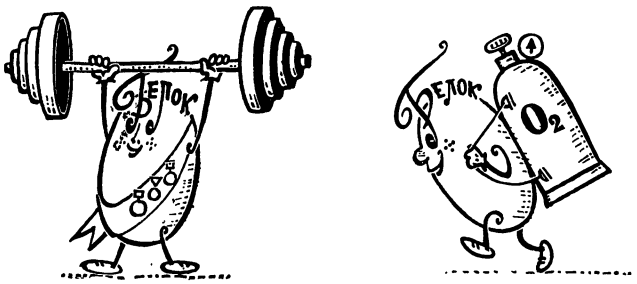
Органические вещества лежат в основе всей живой природы. Растения и животные, микроорганизмы и вирусы — все живые существа состоят из огромного количества различных органических веществ и сравнительно небольшого числа неорганических. Именно соединения углерода, благодаря их великому разнообразию и способности к многочисленным химическим превращениям, явились той основой, на которой возникла жизнь во всех ее проявлениях. Для этого потребовались очень сложные органические вещества, молекулы которых содержат цепи из многих тысяч атомов, т. е. полимеры. Такие полимеры называют б и о п о л и м е р а м и.

Прежде всего это б е л к и — носители жизни, основа живой клетки. Сложные органические полимеры — белки состоят главным образом из углерода, водорода, кислорода, азота и серы. Их молекулы образованы соединением очень большого числа простых молекул — так называемых а м и н о к и с л о т. Аминокислот около двадцати, но соединяются они друг с другом в различном сочетании, строго характерном и постоянном для каждого белка, каждого органа, каждой ткани, каждого вида живых существ. А так как длина белковых молекул может быть очень велика — до нескольких десятков тысяч отдельных аминокислот в цепи, то становится ясно, каким образом именно белки обеспечивают разнообразие проявлений жизни.

Существует очень много разных белков. Есть белки о п о р н ы е, назначение которых формировать скелет, покровы и другие опоры организма. Такие белки входят в состав костей, образуют хрящи, кожу, волосы, рога, копыта, перья, чешую рыб. Есть опорные белки, образующие мышцы и несущие не только опорные, но и сократительные функции. Сокращение мышц (важнейшая роль белков этого типа) — это превращение части химической энергии таких белков в механическую работу. Есть белки крови с самыми разнообразными функциями. Гемоглобин крови, например, служит разносчиком кислорода по организму. Очень большая



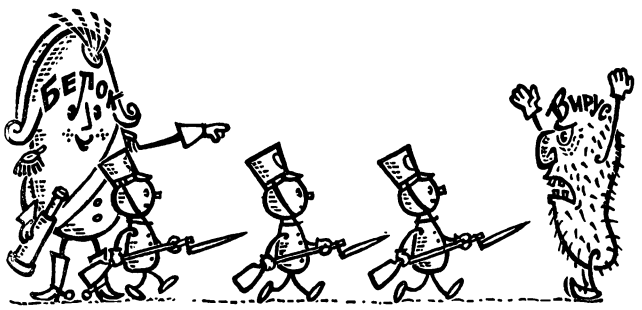

**Пришлось бы затратить много лет жизни тому, кто захотел бы написать теоретически возможные формулы всех изомеров одного лишь сравнительно простого углеводорода — $C_{20}H_{42}$.**




**Белки сокращают мышцы, превращают химическую энергию в механическую. *Справа* белок крови — гемоглобин — разносит кислород по всему организму человека.**

группа белков регулирует химические реакции в организмах. Это ферменты (биологические катализаторы). Их известно более семисот. Высокоразвитые организмы умеют вырабатывать еще и защитные белки, так называемые антитела, которые способны осаждать и тем обезвреживать проникшие извне в организм посторонние вещества и тела.

Наряду с белками важнейшую роль в жизни играют нуклеиновые кислоты. Эти вещества строят белки. В живом организме всегда происходит обмен веществ. Постоянно обновляется состав почти всех его клеток. Обновляются и белки клеток. Но ведь для каждого органа, для каждой ткани нужно изготовить свой специфический белок, со своим неповторимым порядком аминокислот в цепи. Хранители этого порядка — нуклеиновые кислоты. Это тоже полимерные молекулы, сложно построенные, часто в виде двойной спирали из атомов. Нуклеиновые кислоты являются своего рода шаблонами, по которым организмы строят свои белки. Часто образно говорят, что в них записан код синтеза белка. Для каждого белка — свой код, свой шаблон. У нуклеиновых кислот есть еще одна функция. Они шаблоны и для самих нуклеиновых кислот. Это своего рода «запоминающее устройство», при помощи которого каждый вид живых существ передает из поколения в поколение коды построения своих белков.




**В нашем организме вырабатываются защитные белки — антитела. Они охраняют здоровье человека.**

Опорные функции в живой природе выполняют не только белки. В растениях, например, опорные, скелетные вещества — целлюлоза и лигнин. Это тоже полимерные вещества, но совсем другого типа. Длинные цепи атомов целлюлозы построены из молекул глюкозы, относящейся к группе сахаров. Поэтому целлюлозу относят к полисахаридам. Строение лигнина до сих пор окончательно не установлено. Это тоже полимер, по-видимому, с сетчатыми молекулами. А у насекомых опорные функции выполняет хитин — тоже полисахарид.

Есть большая группа веществ (жиры, сахара или углеводы), которые переносят и запасают химическую энергию. Они являются запасным строительным материалом, необходимым для образования новых клеток (см. ст. «Химия пищи»). Множество органических веществ в живых организмах играет роль регуляторов жизнедеятельности (витамины, гормоны). Одни регулируют рост и деление клеток, другие — дыхание или пищеварение, третьи — деятельность нервной системы и т. п. В живых организмах содержатся еще многочисленные вещества самых разнообразных назначений: красящие, которым мир цветов обязан своей красотой, пахучие — привлекающие или отпугивающие, защищающие от внешних врагов, и много других. Растения и животные, даже каждая отдельная клетка, представляют собой очень сложные лаборатории, в которых возникают, превращаются и разлагаются тысячи органических веществ. Многочисленные и разнообразные химические реакции протекают в этих лабораториях в строго определенной последовательности. Создаются, растут и отмирают сложнейшие структуры...

Мир органических веществ окружает нас, мы сами состоим из них, и вся живая природа, с которой мы ежесекундно сталкиваемся, среди которой мы живем и которую мы постоянно используем, состоит из органических веществ.

## ЧЕЛОВЕК И ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

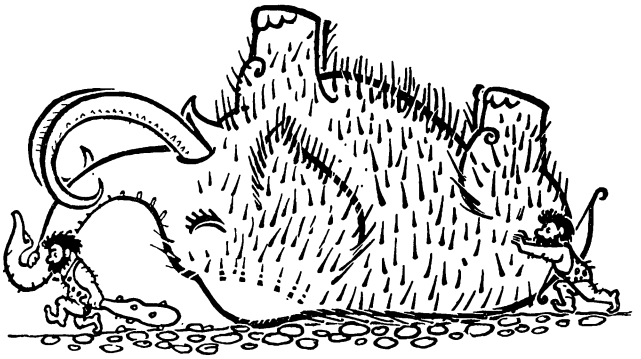
Органические вещества известны человеку с глубокой древности. Прежде всего это природные органические материалы растительного

или животного происхождения, из которых человек делал свои орудия и другие предметы. Из кожи изготовлялись обувь и одежда, шерсть домашних животных или растительные волокна шли на изготовление тканей, древесина служила топливом и одновременно материалом для изготовления орудий и постройки жилищ. Наконец, пища — ведь она вся растительного или животного происхождения и состоит главным образом из органических веществ. Первобытный человек использовал естественные органические материалы в том виде, в каком находил их в природе, придавая им лишь нужные размеры и форму и соединяя отдельные части.

Природные органические материалы обычно представляют собой сложные смеси разных веществ и лишь в редких случаях более или менее отдельные чистые вещества. Например, волокно хлопка состоит почти из чистой целлюлозы. Однако уже сравнительно давно человек научился выделять из природных материалов отдельные полезные ему вещества и превращать одни вещества в другие. Таков был уксус древних — водный раствор уксусной кислоты (приправа к пище), винный спирт (по-латыни «спиритус вини» — дух вина). Брожение сахаристых соков с образованием спирта было известно всем древним народам: древние греки и все народы Малой Азии знали виноградное вино, египтяне и древние германцы — пиво, а древние славяне — мед (напиток из меда). В Азии и Африке издревле было известно крашение тканей и кожи природными органическими красителями. С незапамятных времен применяли настойки и экстракты для врачевания.

Знания веществ и их превращений постепенно расширялись и углублялись, и к XVIII в. они слились в науку химию. Мы считаем началом научной химии XVIII в., потому что только в это время великие химики — М. В. Ломоносов в России и А. Лавуазье во Франции — поставили химию на строгие количественные основы. В химических лабораториях стали применять точное взвешивание веществ. Однако и в тот период человечеству еще не был известен органический синтез, т. е. искусственное получение определенных органических веществ из простейших исходных соединений, хотя люди уже умели перерабатывать одни вещества в другие.

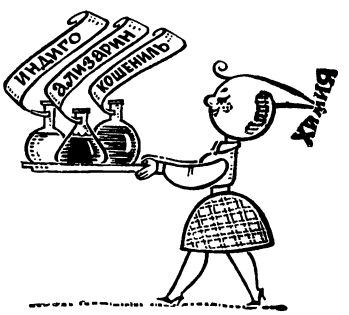
В 1856 г. английский химик Перкин получил первый синтетический органический краситель — м о в е и н. Эта пурпурная краска образовалась при окислении неочищенного а н и л и н а. Он сразу оценил практическое значение



Древний человек использовал органические вещества в том виде, в каком находил их в природе.

своего открытия. Ведь анилин можно было получить из бензола по способу, открытому незадолго до этого русским химиком Н. Н. Зининым,— восстановлением н и т р о б е н з о л а. А бензол уже тогда умели получать из каменноугольного дегтя — отброса производства светильного газа из угля. Начиная с 1814 г. этот способ освещения городов светильным газом быстро распространился из Англии на континент и... столь же быстро стали расти груды неиспользованного отхода — дегтя, который в лучшем случае применялся для обмазки стен или как плохое топливо. Перкин запатентовал свое открытие и уже в следующем году стал производить мовеин фабричным путем.

В то время химики знали много хороших красителей для тканей: и н д и г о, а л и з а р и н, к о ш е н и л ь, различные сорта с а н д а л о в. Однако все это были дорогие вещества. Прекрасный алый краситель — кошениль добывалась в Мексике; она представляет собой высушенные и измельченные тела насекомых — червецов, живущих на некоторых видах кактусов. Ради синего индиго во многих странах разводили плантации вайды — растения, из которого получали индикан, образующий при специальной обработке индоксил, легко окисляющийся на воздухе в индиго.




На смену природным красителям пришли более дешевые— синтетические.

Синтетические красители оказались несравненно более дешевыми. Так, синтетическое индиго быстро вытеснило природное, и вайда как сельскохозяйственная культура исчезла с полей

Европы. Синтетический ализарин вытеснил природный ализарин, который добывали из корней марены, и культура марены, как и вайды, прекратила свое существование. Впервые человек заменил природные органические вещества синтетическими, получаемыми химической переработкой из каменноугольной смолы, т. е. в конечном счете из каменного угля.

Пожалуй, не будет преувеличением сказать, что потребность производства красящих веществ для текстильной промышленности в течение многих десятилетий стимулировала и направляла развитие органического синтеза.

## СОЗДАНИЕ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Синтез мовеина был случайным. Перкин на самом деле собирался получить бесцветное вещество хинин — лекарство против малярии, а получил краску. Теперь мы знаем, что хинин он таким образом и не мог получить, но в те времена этого знать было нельзя. Химики не имели тогда еще и представления о строении молекул органических веществ.

Середина XIX в. — очень интересный период в развитии химии. Ученые достигли высокой техники лабораторных работ. Открытия новых веществ сыпались как из рога изобилия. И все же для развития органического синтеза не хватало теории. Было сделано много опытов, стали известны уже многие органические вещества и их превращения, но не было теории, которая могла бы объяснить все эти превращения, могла бы предсказывать новые еще неизвестные вещества, могла бы направлять работу по синтезу. По образному выражению Вёлера, органическая химия в этот период представлялась ему дремучим лесом, изобилующим чудесными вещами, огромную чащу без выхода, без конца. Лишь пользуясь теорией, можно было найти дорогу в этом лесу.

Такая теория возникла во второй половине XIX в. В 1861 г. казанский профессор органической химии Александр Михайлович Бутлеров впервые высказал и позже доказал опытным путем основной принцип теории химического строения: свойства веществ зависят не только от их состава, но и от химического строения, т. е. от последовательности и характера связей атомов в молекуле. Изучая химические свойства веществ, можно на основании реакций установить химическое строение их молекул. Сейчас все это выглядит очень просто. Однако в то время эта теория была революционной, так как позволяла не только изучать превращения веществ, но через превращения познать их внутреннюю структуру и предсказать новые, еще не изученные свойства.

В создании теории химического строения выдающуюся роль сыграли еще два химика — немецкий химик Август Кекуле и молодой англичанин Арчибальд Купер. Кекуле в 1858 г. открыл четырехвалентность углерода и способность этого элемента образовывать цепи атомов. Купер разработал способ изображения строения молекул органических веществ при помощи структурных формул (1858).

Новая теория стала быстро развиваться. Эрленмейер (1864) открыл двойные связи между атомами углерода, Вант-Гофф и Ле Бель (1874) ввели представление о пространственном расположении атомов. В. В. Марковников (1869) разработал учение о взаимном влиянии атомов в молекуле. В первой половине XX в. теория химического строения обогатилась учением о валентных электронах и об электронной природе связей между атомами. Теория строения органических веществ стала электронной теорией. Новая квантовая физика внесла в нее методы математического расчета строения молекул. Вот уже более ста лет теория химического строения является путеводной звездой для исследований в области органической химии; она дала столь могущественный и длительный толчок исследованиям, какой лишь редко исходил из какой-либо другой естественнонаучной теории.

Итак, теория была найдена. С этого времени начался быстрый, все возрастающий рост органического синтеза. Химики почувствовали в своих руках изумительное по своей остроте и надежности средство предвидения. Всякое вещество получало формулу строения. Формула предсказывала существование неизвестного вещества, и это вещество удавалось синтезировать. Формула предсказывала химические свойства вещества, его химические реакции, и эти реакции удавалось осуществить в лаборатории. Синтезировались тысячи, десятки и сотни тысяч новых веществ, и все они укладывались в систему теории. Это был триумф теории химического строения. Конечно, находились вещества или их химические реакции, которые не укладывались в уже известные рамки теории. Что ж, эти факты только служили ее дальнейшему развитию. Теория обогащалась, развивалась, совершенствовалась...

А поток новых веществ все увеличивался... Новые красители, лекарственные препараты, душистые вещества, растворители, дубильные вещества и многие другие... Во все области производства проникали все новые органические вещества. Из рук ученых они попадали в руки инженеров-химиков. Вещество, которое с радостным волнением первооткрывателя еще недавно держал в пробирке ученый, становилось предметом промышленного производства; граммы сменялись килограммами, тоннами, сотнями, тысячами тонн.

Краски для хлопка, шерсти и шелка всех цветов и оттенков!

## КРАСКИ ВСЕХ ЦВЕТОВ И ОТТЕНКОВ

Долгое время красочная промышленность держала первенство в развитии промышленного органического синтеза, а химия красящих веществ ежегодно давала наибольшее число новых органических соединений. Коксохимия — переработка каменноугольной смолы — явилась замечательным источником полупродуктов для производства красок. Из этой смолы было выделено более 150 различных органических веществ, многие оказались прекрасным сырьем для изготовления красок.

Краски для хлопка, краски для шерсти, краски для шелка, краски всех цветов и оттенков, все более яркие, все более прочные! Люди хотят одеваться дешево, красиво — повышаются требования к цвету, его чистоте, оттенку, к тому, чтобы окрашенные ткани не линяли при стирке, не выцветали на солнце. В ответ на эти требования появлялись все новые и новые красители; дешевые вытесняли дорогие, лучшие вытесняли хорошие.

Получили распространение самые разнообразные способы крашения тканей: с у б с т а н т и в н о е, когда ткань, проходя через красильную барку, сама «выбирает» краситель из раствора; п р о т р а в н о е, когда ткань сначала пропитывается «протравой», содержащей соли тяжелых металлов — хрома, алюминия, олова и других, потом ее красят в барке и затем уже подвергают «запарке» при повышенной температуре; при этом соль металла образует с красителем яркий, прочный, несмываемый лак; при так называемом л е д я н о м крашении ткань пропитывается при низкой температуре последовательно двумя бесцветными растворами, содержащими вещества, которые уже на ткани вступают в химическую реакцию образования красителя. Очень прочные окраски дает к у б о в о е крашение. Нерастворимый в воде краситель сначала переводится в бесцветное, но растворимое в воде вещество; этим раствором «красят» ткань, и из красильной барки она выходит бесцветной, но при «запарке» происходит окисление кислородом воздуха, и снова из бесцветного вещества образуется краситель, прочно отложившийся на волокне.

А сколько изобретательности было проявлено для печатания рисунков на ткани. Есть, например, черная ткань с ярким цветным рисунком. Это так называемые «в ы т р а в к и» п о ч е р н о м у а н и л и н у. Ткань красят анилином (бесцветным веществом) в смеси с окислителем, который потом при запарке превратит анилин в черную краску «черный анилин». Потом по этой ткани печатают цветной рисунок на ситцепечатных машинах, а в краски добавляют специальные вещества (восстановители), которые предотвращают превращение анилина в черный анилин там, где напечатан цветной рисунок. Получается при запарке черная ткань с ярким цветным рисунком. Существует много еще разных приемов крашения и печатания. Искусство крашения тканей и печатания на них рисунка требует специальных знаний, и специалисты этого дела — колористы — совмещают в своем труде знания химика, опыт инженера и чутье художника.

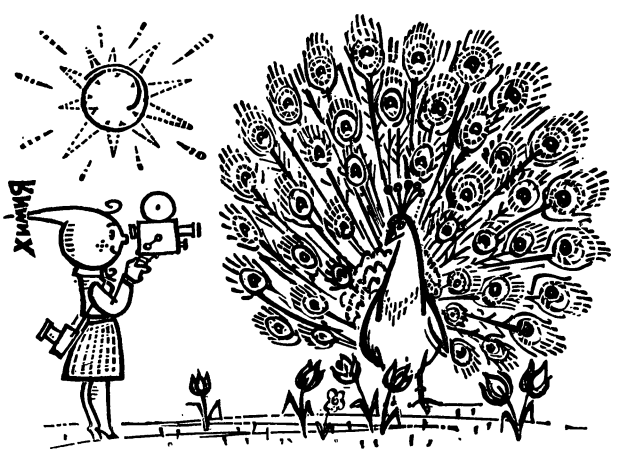
Органические красители нужны также для окрашивания кожи, меха, для изготовления цветных чернил, для книгопечатания, живописи, цветного кино и для многих других целей. Во всех случаях к красителям предъявляются разные требования, и химики должны были искать и находили вещества, удовлетворяющие этим требованиям.

Еще недавно казалось, что химики-красочники в союзе с колористами решили все основные задачи. Но в последнее десятилетие появилось много новых синтетических волокон для

текстильных тканей: капрон, лавсан, нитрон и др. Оказалось, что старые красители непригодны для окрашивания новых тканей. И снова исследования, новые синтезы, новые органические вещества...

## ОРГАНИЧЕСКИЕ КРАСИТЕЛИ ДЛЯ ФОТОГРАФИИ И КИНО

Как известно, ранее выпускавшиеся фотографические пластинки и пленки были нечувствительны к красному цвету. Поэтому их проявляли при свете красного фонаря. Светочувствительность была различной к разным участкам спектра: очень высокая к фиолетовым и синим лучам, она понижалась к красному концу спектра. Поэтому фотоснимок неточно передавал тона изображения. Общая светочувствительность этих пластинок и пленок была невелика; при фотографировании применялись большие выдержки, что очень сокращало возможности моментальной фотографии. Перед химиками встал вопрос, как повысить чувствительность фотопленок и сделать ее более равномерной по отношению к различным цветам. Эта задача была решена. Были найдены новые красители — так называемые сенсибилизаторы, повышающие чувствительность фотографического слоя к свету. Появились ортохроматические пластинки, дополнительно очувствленные к желто-оранжевой части спектра, панхроматические — чувствительные ко всем цветам видимого света. Эти пленки подлежат обработке в полной темноте, что, конечно, неудобно, особенно для целей художественной фотографии. Однако и это неудобство было преодолено. Были найдены специальные красители — десенсибилизаторы.




**Цветная фотография — вот способ запечатлеть разнообразные цветовые оттенки природы.**

Если перед проявлением экспонированную пленку обработать в темноте раствором десенсибилизатора, то потом ее можно проявлять... на свету. Пленка почти полностью потеряла свою светочувствительность.

Были найдены также специальные инфракрасные сенсибилизаторы, и фотографирование стало возможным через дымку и даже ночью. Новые инфрахроматические фотопленки оказались очень ценными для астрономической съемки.

Интересно решили химики задачу цветного фотографирования. Она была очень трудна и потребовала десятилетий упорного исследовательского труда.

Пленка для цветного фотографирования содержит обычно три цветочувствительных слоя. В каждом слое находится, как обычно, светочувствительное бромистое серебро. В одном слое к нему добавлен сенсибилизатор, делающий его чувствительным только к красным лучам, в другом — к зеленым, в третьем — к голубым. В каждый слой, кроме того, введены так называемые цветные компоненты — пока бесцветные вещества. После фотографирования такая пленка проявляется специальным проявителем. В первом слое проявляются только те места пленки, куда упал красный свет, так как к другим лучам этот слой нечувствителен. Бромистое серебро в этом месте восстанавливается и превращается в черное металлическое серебро, а то, что образовалось из проявителя в процессе проявления, вступает в реакцию с цветной компонентой и образует красную краску. Таким же образом во втором слое образуется зеленая краска в тех местах, куда упали зеленые лучи, а в третьем слое — синяя. Теперь остается удалить из изображения металлическое серебро и остаток бромистого серебра (эта операция похожа на обычное «закрепление»), и цветное изображение готово. Такой процесс называется процессом с «обращением», а пленка — «обратимой», так как на ней сразу появляются натуральные цвета. Другой процесс — «негативный» — сложнее, но основан на тех же простых принципах.

Кажется, просто? А ведь потребовалось испытать тысячи красителей, сотни сенсибилизаторов, десятки проявителей, чтобы все это подобрать. Когда вы смотрите в кино красивый цветной фильм, вспомните об энтузиастах-иска-

телях, трудолюбивых и изобретательных химиках, создавших цветную кинопленку и цветное проявление.

## ЛЕКАРСТВЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА

Применение органических веществ для врачевания началось еще на ранних ступенях развития человека. Уже в древнем Египте были известны многие лекарственные растения: клещевина, горчица, морской лук и др. Древние греки и римляне не только хорошо знали лечебное действие многих растений, но и умели готовить из них экстракты, настойки, пилюли и прочие лекарственные средства. Многие лекарственные средства растительного происхождения стали известны европейцам после великих географических открытий XVI—XVII вв. Из Америки, например, была привезена кора хинного дерева, ипекакуана, гидрастис. Издревле народы Средней Азии знали много лекарственных растений. Знания их были собраны в «Медицинском каноне» знаменитого таджикского ученого X —XI вв. Ибн-Сина, или Авиценны.

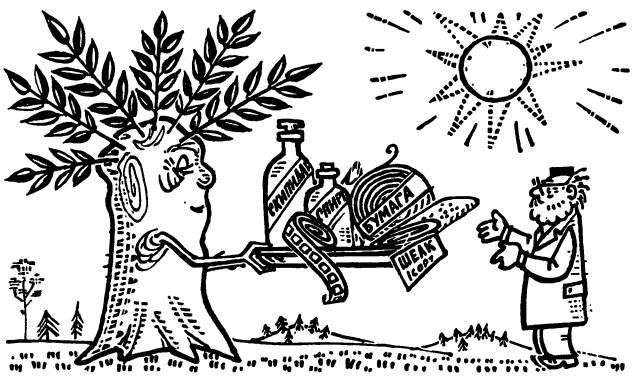
С развитием научной химии все в большем количестве вместо целых растений или растительных экстрактов стали применять лекарственные вещества, выделенные из растений в более или менее чистом виде. Позже началось применение синтетических лекарственных веществ. Это произошло одновременно с развитием химии красящих веществ. Основатель химиотерапии — науки о лечении инфекционных заболеваний химическими средствами — П. Эрлих исходил из опыта окрашивания микробов под микроскопом. Он считал, что с микробами можно бороться ядовитыми для них красками. Действительно, метиленовый синий краситель оказался пригодным для лечения малярии. Особого успеха ученый добился в использовании красителей, содержащих в молекуле мышьяк. Потом оказалось, что лекарства могут быть найдены и среди бесцветных веществ. Чтобы найти нужное органическое вещество, Эрлих испытывал большое количество веществ, каждое из которых отличалось от предыдущего лишь небольшим изменением в строении молекулы. Если изменение в строении ухудшало лечебное действие, Эрлих от него отказывался; если улучшало, он сохранял это изменение в следующих веществах и т. д. На этом пути нужен был синтез очень большого количества веществ и их последовательные испытания, что отнимало много времени и сил, однако в конце концов приводило к цели. Это эмпирический метод. Он сохранил свое значение и в наши дни.

Синтезированы тысячи лекарственных препаратов.

Однако более рационален другой путь, который основывается на глубоком изучении способа действия лекарственного вещества. Нужно знать, как оно распределяется в организме, на какие органы действует, в какие химические реакции вступает. Средства против инфекционных болезней должны быть ядовиты для микробов—возбудителей болезни, но неопасны для человека; средства против неинфекционных болезней должны действовать на одни органы человека и не затрагивать других. Знание механизма действия, особенно его химической стороны, позволяет находить избирательно действующие вещества и, значит, более целеустремленно и сознательно синтезировать новые средства лечения заболеваний.

Есть, например, хорошо известный бактерицидный (убивающий микробов) препарат — хиназол. Механизм его действия был полностью установлен. Дело в том, что для нормального роста микроорганизмов необходимы соли кобальта. Человеку тоже нужен кобальт. Но только в виде сложного соединения — витамина $B_{12}$. Хиназол очень легко соединяется с кобальтом, образуя прочное химическое соединение, но не может отнять кобальт от молекулы витамина $B_{12}$. Отсюда ясно, почему хиназол ядовит для микробов: он лишает их солей кобальта. Он не ядовит для людей, так как не затрагивает витамина $B_{12}$. Поняв все это, химики получили возможность синтезировать новое сильнодействующее средство для лечения кишечных заболеваний — энтеросептол. Строением молекулы это вещество похоже на хиназол и очень прочно связывает ионы кобальта.

Много новых лекарственных веществ синтезировали химики за последнее время. Появились новые средства лечения инфекционных болезней и даже таких опасных, как туберкулез или малярия, пневмония или менингит; средства, регулирующие кровяное давление, стимулирующие деятельность сердца, обезболивающие, снотворные; созданы препараты для лечения психических заболеваний, а в последнее время появились первые надежды найти химические




Вот что дерево подарило химикам.

средства лечения рака. И здесь, как и в химии красящих веществ, трудится целая армия химиков, физиологов, бактериологов, фармакологов, врачей. Синтезируют тысячи и десятки тысяч веществ. Одних только сульфамидных препаратов было синтезировано свыше 4000, чтобы в конечном счете остановиться на десятке из них для внедрения в медицину.

## ЛЕС—ИСТОЧНИК ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Более ста лет главным источником для промышленного получения органических веществ служила каменноугольная смола, образующаяся при коксовании каменных углей. Много химических продуктов поставляет лесохимия.

При нагревании древесины без доступа воздуха происходит обугливание; при этом образуется древесный уголь, смола и летучие продукты. Древесный уголь идет в доменное производство, а также для изготовления активированного угля; смола или деготь — на приготовление флотационных масел и других продуктов, а летучие вещества, конденсирующиеся в виде дегтярной воды, используются для выделения из них метилового спирта, уксусной кислоты, ацетона.

Углежжение — сухая перегонка дерева — известно с незапамятных времен. Сначала дрова обугливали в кучах, покрытых слоем земли, потом в примитивных печах. При этом все ценные летучие продукты терялись. Теперь процесс обугливания ведется в металлических печах — ретортах, куда вкатываются вагонетки с дровами. Летучие продукты полностью улавливаются. По окончании процесса из реторт выкатываются вагонетки с углем. Миллионы кубических метров дров, главным образом березовых и осиновых, ежегодно превращают в уголь.

Другой лесохимический источник органических продуктов — живица хвойных, главным образом сосны. Ствол и ветви сосны имеют систему так называемых смоляных ходов, заполненных жидкой смолой. При ранении дерева липкая смола затягивает рану и защищает его от проникновения насекомых, микроорганизмов и т. п. Чтобы получить сосновую смолу, на дереве делают специальные надрезы — карры, из которых постепенно вытекает светло-желтая липкая, приятно пахнущая смола — живица. На воздухе она постепенно густеет и темнеет. Из живицы перегонкой получают скипидар и канифоль, используемые для различных технических целей.

Главные продукты химической переработки древесины — это целлюлоза и бумага. В отличие от углежжения здесь используется древесина хвойных пород, в основном еловая. Часто сырьем для производства целлюлозы служат отходы лесопильных заводов. Целлюлоза нужна для изготовления искусственного шелка (вискозный и ацетатный шелк), нитроцеллюлозы (для производства кинопленки), пироксилина (взрывчатое вещество, из которого изготовляют бездымный порох). В последнее время быстро развивается производство спирта из древесины.

Много других видов растительного сырья применяют для получения органических веществ. Из сахарной свеклы или сахарного тростника получают сахар, из семян масличных растений — подсолнечника, льна, хлопка, кукурузы — добывают растительные жиры, из эфироносных и душистых растений, таких, как мята, анис, миндаль, жасмин, получают пахучие масла для парфюмерии, из каучуконосных деревьев, разводимых в Южной Америке, в Индонезии и в других тропических странах,— каучук, из дубильных растений — дубильные экстракты для выделки кож и т. п.

## «ЧЕРНОЕ ЗОЛОТО»—НЕФТЬ

Ни коксохимия, ни лесохимия, ни другие менее крупные источники органических веществ, не смогли, однако, удовлетворить все возрастающую потребность человечества в органических веществах. Начиная с 20-х годов нашего века на первое место среди источников химического сырья вышли нефть и природные газы.

Нефть — это смесь углеводородов с самыми разнообразными цепочками атомов углерода.

Встречаются и короткие цепи, и длинные, и нормальные, и разветвленные, и замкнутые в кольца, и многокольчатые. Кроме углеводородов, в нефти содержатся в небольшом количестве кислородные и сернистые соединения и совсем немного азотистых. Впрочем, нефть Второго Баку содержит много сернистых соединений.

Нефть возникла на Земле в прошлые геологические эпохи в результате разложения грандиозных скоплений растительных и животных остатков, особенно морского планктона. В ходе геологических процессов нефть видоизменялась, перемещалась из одних слоев в другие и, наконец, образовала известные нам крупные месторождения: на Кавказе, в Поволжье и Приуралье, в Иране, Месопотамии и Ираке, в Калифорнии и в Техасе, в Венесуэле, в Сахаре и в других районах земного шара.

Очень интересна история добычи и переработки нефти. Как и многие другие источники органических веществ, она была известна многим древним народам. Раскопки на берегах Евфрата установили, что за 6000—4000 лет до нашей эры нефть применяли как топливо. Есть сведения, что у нас на Кавказе нефть использовалась 2000 лет тому назад. Арабский историк Истархи, живший в VIII в., свидетельствует, что с древних времен бакинцы вместо дров жгли землю, пропитанную нефтью. Нефть издавна вывозилась из Баку в качестве осветительного материала.

Промышленная добыча нефти началась, однако, гораздо позже — только с середины XIX в., когда стали применять бурение скважин. В те времена нефть перерабатывалась в основном на осветительные (керосин) и смазочные масла. Потом ее стали употреблять как топливо для паровых котлов, главным образом пароходных и позже паровозных (мазут). С появлением двигателей внутреннего сгорания, изобретенных Дизелем, продукты перегонки нефти — керосин и соляровые масла (а для тихоходных двигателей также и более тяжелые масла) — нашли широкое применение в качестве дизельного топлива. Все это вызвало быстрое развитие добычи и переработки нефти. Наиболее простой метод переработки нефти — прямая гонка. Этот метод заключается в перегонке нефти при нагревании в закрытых котлах или трубчатках с отводными трубами, соединенными с холодильниками. Сначала отгоняются наиболее легкокипящие погоны (бензины, лигроин), потом более тяжелый керосин. Бензины состоят из углеводородов с пятью — десятью атомами углерода в молекуле, а керосиновые погоны — из углеводородов с десятью — пятнадцатью атомами углерода. Остаток от перегонки — мазут — густая черная жидкость. Он употребляется как топливо или подвергается новой перегонке, чтобы выделить смазочные масла: легкие — соляровые, более тяжелые — веретенные и машинные и, наконец, тяжелые — цилиндровые.

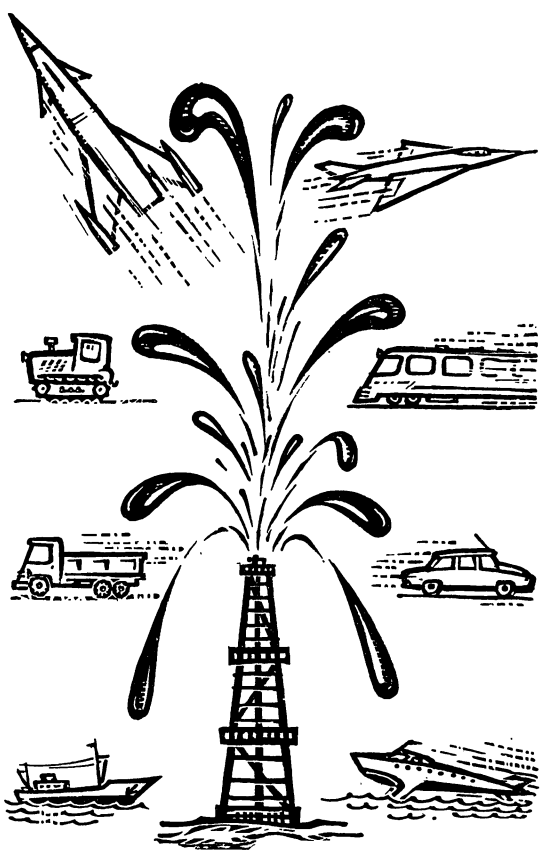
В начале нашего века произошли коренные изменения в нефтепереработке. Быстрое распространение карбюраторных бензиновых двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием для автомобилей (а позже в авиации) потребовало очень много бензина. Это привело прежде всего к усовершенствованию нефтедобычи, так как при старом открытом способе много легкокипящих фракций испарялось на воздухе. Однако этого было недостаточно. При прямой гонке получалось сравнительно мало бензиновых фракций, и они не могли удовлетворить все возрастающий спрос. Особенно остро почувствовалась нехватка бензина в годы первой мировой войны. Тогда в промышленность был введен крекинг-процесс — разложение углеводородов нефти под влиянием высокой температуры. При нагреве до 500—600° углеводородные цепочки разрываются и образуются осколки с меньшим числом атомов углерода в молекуле. Промышленное освоение крекинг-процесса сразу повысило ресурсы бензина. Однако не во всех случаях качество бензинов термического крекинга было удовлетворительным. Особенно оно не удовлетворяло авиацию.

Русский химик Н. Д. Зелинский предложил усовершенствовать крекинг с помощью ускорителей процесса — катализаторов. Он применил в качестве катализатора хлористый алюминий. Еще лучшие результаты дало применение алюмосиликатного катализатора, предложенного французскими инженерами. Этот процесс давал высококачественный бензин, пригодный для авиационных двигателей.

Однако жизнь шла вперед. От бензиновых двигателей внутреннего сгорания требовалась все большая быстроходность, все большая мощность при все уменьшающихся размерах и весе, приходящихся на единицу мощности. Этого удалось достичь, повышая степень сжатия топлива в цилиндрах двигателя. Однако здесь появился предел, связанный с детонацией топлива. В момент сильного и быстрого сжатия паровоздушная смесь преждевременно взрывалась, и это приводило к стуку в двигателе и потере мощности. Борьба с детонацией стала на долгий период главной задачей улучшения методов нефтепере-

работки. Оказалось, что различные углеводороды, содержащиеся в бензинах, детонируют с различной легкостью. Хуже всего в этом отношении оказались углеводороды с нормальной цепочкой атомов углерода. Углеводороды с сильно разветвленными цепочками атомов, а также ароматические детонировали труднее.

Способность бензинов противостоять детонации характеризуют так называемым о к т а н о в ы м ч и с л о м: чем оно выше, тем лучше. Значит, и нефть нужно перерабатывать так, чтобы получать бензины с возможно большими октановыми числами. В этом отношении каталитический крекинг гораздо лучше простого термического. Появились новые процессы нефтепереработки — «риформинг», «платформинг». Особое значение в них получили реакции ароматизации нефтяных углеводородов, открытые и разработанные советскими химиками. Промышленность стала даже на путь синтеза углеводородов с разветвленной цепью (и з о о к т а н а и т р и п т а н а), чтобы их прибавлять к бензинам и повышать таким образом антидетонационные свойства. Особенного успеха удалось



достичь в применении специальных добавок к топливу — так называемых а н т и д е т о н а т о р о в. Добавленные в небольшом количестве к бензину, они значительно повышают его октановое число. Это тетраэтилсвинец (сокращенно ТЭС). Этилированный бензин с этим антидетонатором очень ядовит. Будьте всегда осторожны с этилированным бензином: не обливайте им рук, не засасывайте в рот через шланг при переливании. Немедленно сотрите, смойте попавший на вас этилированный бензин!

Теперь найден лучший антидетонатор, чем ТЭС. Это вещество со сложным названием — циклопентадиенилтрикарбонил марганца, или ЦТМ. Как видно из названия, это органическое вещество содержит марганец. Скоро появятся в гаражах «марганцевые» бензины.

Казалось, переработка нефти решила все проблемы, поставленные перед ней автомобильными и авиационными конструкторами. Но жизнь опять пошла вперед. На смену двигателям внутреннего сгорания пришли реактивные и ракетные двигатели. Оказалось, что здесь не нужны высокие октановые числа. Наоборот, лучшее топливо — это углеводороды с прямыми малоразветвленными цепочками атомов углерода или кольчатые. Все наоборот! И совсем не бензиновые фракции, а керосиновые и соляровые. И снова поиск, снова открытия, снова изменения нефтепереработки.

И это еще не все! До сих пор речь шла о применении нефтепродуктов в качестве топлива. Менялись типы двигателей: от паровых к дизелям, к бензиновым моторам, потом к реактивным двигателям. Но оставалось в принципе то, что от нефтяных углеводородов требовалась их теплотворная способность. Только тепло, образующееся при сгорании топлива!

Для химика-органика сжигание нефтяных углеводородов — непростительное расточительство. Ведь эти углеводороды так нужны для химического синтеза! Из них можно сделать так много ценных химических продуктов! И нефтехимический синтез выступил мощным конкурентом транспорта в потреблении нефти. Прежде всего пошли в дело нефтяные газы, состоящие из углеводородов с маленькими цепочками атомов углерода — от одного до пяти. Из этилена $CH_2 = CH_2$ можно делать этиловый спирт, а из него — с и н т е т и ч е с к и й к а у ч у к (СК). Из этилена же получается прекрасный широко известный полимер — п о л и э т и л е н. Из пропилена $CH_3CH = CH_2$ можно делать и з о п р о п и л о в ы й спирт и ацетон; про-

пилен нужен для производства фенола, наконец, из него можно делать полипропилен — полимер, дающий новый тип синтетического волокна. А в последнее время научились из пропилена делать акрилонитрил (НАК) — сырье для производства синтетической шерсти. Другие нефтяные газы тоже находят важное применение в нефтехимическом синтезе. Значит, нефтепереработку нужно вести иначе. Нужно получать как можно больше газов, особенно таких, молекулы которых содержат двойные связи между атомами углерода.

Между нефтью-топливом и нефтью—химическим сырьем началась напряженная борьба.

Конечно, в настоящее и ближайшее время нефть будут использовать, главным образом, как топливо. Однако доля нефти, расходуемая на химическую переработку, непрерывно возрастает.

А совсем недавно появился еще один возможный потребитель нефти. Он пока еще «младенец», и ему много нефти не нужно. Но как знать? Это микробиологическая переработка нефти на ... белки. Нашлись бактерии, которые хорошо живут на нефти, потребляя ее в пищу. Нефть исчезает, бактерии растут. Постепенно (и не так уж медленно) исчезает значительная часть нефти, и вместо нее образуется масса клеток бактерий. Это в основном белок. И по всем данным — хороший кормовой белок. Во что вырастет этот «младенец»? Не изменит ли он снова баланс путей переработки нефти? Не изменит ли он структуру сельского хозяйства?

До сих пор шла речь о газах нефтепереработки. Однако есть и природный газ, образующий громадные скопления в толще земли. Природный газ в основном состоит из метана $CH_4$. Он добывается в громадных количествах и используется в качестве горючего для промышленных и бытовых целей. Вместе с нефтяными газами, сопутствующими нефти, и газами нефтепереработки природный газ является важным источником для синтеза разнообразных органических веществ. Самым большим химическим потребителем газа является промышленность полимерных материалов (см. ст. «Полимеры»).

## ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

В повышении урожаев зерна, хлопка, сахарной свеклы и других сельскохозяйственных культур большую роль играют органические вещества. Прежде всего речь идет о средствах защиты растений от сорняков, вредителей и болезней. Уже давно химики старались найти вещества, ядовитые для сорняков и безвредные для полезных растений. Такие вещества были найдены — это гербициды. Теперь их известно уже много и с разным строением молекул. Одни из них уничтожают широколиственные сорняки и не затрагивают злаки. Другие, наоборот, уничтожают злаки-сорняки и не трогают, например, хлопчатник. Есть специальные гербициды для защиты от сорняков кукурузы, сахарной свеклы. Но трудно найти вещества для химической прополки злаковых культур от злаковых же сорняков, например от упрямого пырея.

Есть средства, которые не убивают растения, а только вызывают у них опадение листьев. Это так называемые дефолианты. Такие вещества нужны, например, для обработки посевов хлопчатника перед сбором урожая. Сбор хлопка вручную — дело очень трудоемкое. Сконструированы специальные машины для сбора хлопка. Однако работе этих машин очень мешают листья. Поэтому перед сбором урожая нужно удалить у хлопчатника листья и притом так, чтобы не повредить раскрывшиеся коробочки хлопка. Вот здесь-то и приходят на помощь дефолианты. Достаточно обработать поле с самолета раствором дефолианта, чтобы через некоторое время все листья опали, а коробочки с хлопком остались на ветках.

Есть еще так называемые ростовые вещества. Они родственны гербицидам, но не убивают растения, а, наоборот, вызывают их усиленный рост. Бывает и так, что одно и то же вещество в малых количествах действует на растения как ростовое вещество, а в больших — как гербицид.

Не менее разнообразна и увлекательна защита растений от насекомых-вредителей. Существует множество насекомых, питающихся культурными растениями. Некоторые из них размножаются в таком количестве, что становятся сущим бедствием. Кто не читал про саранчу, которая превращает цветущие поля в голую землю. Есть не менее опасные вредители: они не летают тучами, как саранча, но основательно портят, а иногда и полностью уничтожают урожай. Таковы, например, клоп — вредная черепашка (повреждает посевы пшеницы) или паутинный клещ (уничтожает посевы хлопчатника). А кому не приходилось видеть яблоки, поврежденные плодожоркой.

Опять труд тысяч химиков! Опять искания энтузиастов. И опять открытие препаратов —

инсектицидов, уничтожающих вредителей. Были найдены так называемые контактные препараты; они уничтожали насекомых при попадании яда на поверхность их тела. Таковы ДДТ, хлорофос. Были открыты также инсектициды системного, или внутрирастительного, действия. Когда такой препарат попадает на растение, оно всасывает его. Соки растения становятся ядовитыми. И горе насекомому-вредителю, которое попытается питаться соками этого растения. Оно погибнет! Лучшие системные инсектициды содержат фосфор: это фосфорорганические вещества, например фосфамид, препарат М-81.

Конечно, и здесь все совсем не просто. Ведь растения, опрыснутые или опыленные ядами, могут быть ядовиты и для людей! Значит, нужно отыскать такие инсектициды, которые ядовиты для насекомых и неопасны для людей и домашних животных. Это в принципе та же задача избирательности действия, о которой мы говорили в разделе о лекарственных веществах. Уже сами шифры — названия некоторых препаратов — иногда говорят о большой работе, проделанной перед тем, как их нашли: Е-605, М-81, Байер-S-1752. Подумайте, сколько веществ нужно было синтезировать и испытать!

И здесь многое еще остается нерешенным. Мы плохо умеем бороться с мальвовой молью, повреждающей хлопчатник, с колорадским жуком — опасным вредителем картофеля, с филлоксерой виноградников.

Кроме насекомых, растения часто повреждают болезни — грибковые, вирусные, бактериальные. И здесь нужны органические препараты — лекарства для растений! Снова тысячи препаратов, снова искания, находки, промышленное производство найденных органических веществ. И опять еще не решенные задачи! Есть, например, опасное заболевание хлопчатника — вилт. Оно поражает тысячи гектаров посевов, а средств борьбы с ним еще нет. Но будут, обязательно будут, если только к этому делу применить знания, фантазию и упорство.

Мир окружающих нас органических веществ грандиозен по количеству и разнообразию. В известной части он создан руками человека, синтезировавшего сотни тысяч веществ, ранее природе неизвестных. Человек научился изменять этот мир, научился заставлять его служить себе, помогать себе в самых разнообразных видах деятельности, в самых разнообразных случаях жизни. Это результат грандиозного труда, начинающегося в лабораториях и кончающегося на фабриках и заводах, на полях и плантациях, в клиниках и больницах... Это результат кропотливых исследований, тщательного изучения, вдохновенных идей и смелых теоретических обобщений. Гений человека и упорный труд рука об руку создали органическую химию. Они решили множество труднейших задач, ранее считавшихся неразрешимыми, создали изобилие веществ, ранее казавшихся недоступными, раскрыли сокровенные тайны природы, ранее представлявшиеся навсегда скрытыми. Науки об органических веществах — органическая химия и ее сестра — органическая химическая технология—продолжают идти вперед. Еще много нерешенных задач, неоткрытых законов, неизвестных веществ. Каждая решенная задача призывает к решению новой, каждое синтезированное вещество влечет за собой новые синтезы, каждый открытый закон ставит перед наукой новые вопросы. Производство требует улучшения, повышения качества, расширения ассортимента. Наша страна нуждается в изобилии продуктов, изобилии вещей, изобилии средств их созидания. С изобилием придет коммунизм: полностью будут удовлетворяться потребности людей, расцветут их таланты, облегчится труд. И органическая химия, создающая новые органические вещества, внесет свою лепту в светлое будущее человечества.

■

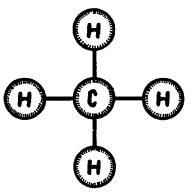
## КАК ХИМИК СТРОИТ НУЖНУЮ МОЛЕКУЛУ

Прежде чем построить молекулу, химик должен знать ее состав и структуру (строение), т. е. представлять себе, как взаимно расположены составляющие ее атомы элементов.

Строение молекул неорганических веществ выяснить не так трудно. Для этого нужно знать их состав и валентность элементов, из которых они образованы. Валентностью называют число атомов, с которым может соединиться атом того или другого элемента. Рассмотрим это на примерах. Возьмем соединения, состав которых хорошо известен: хлористый водород

HCl, вода $H_2O$, аммиак $NH_3$, болотный, или рудничный, газ — метан $CH_4$. Общее для их состава — водород, но он входит в них в разных количествах.

В хлористом водороде с одним атомом хлора соединен один атом водорода, в воде с одним атомом кислорода соединены два атома водорода, в аммиаке с одним атомом азота соединены три атома водорода, в метане с одним атомом углерода соединены четыре атома водорода. Атомы хлора, кислорода, азота и углерода не могут присоединить к себе больше указанного числа атомов водорода. Поэтому говорят, что они обладают определенной валентностью: атом хлора одновалентен, атом кислорода двухвалентен, атом азота трехвалентен, атом углерода четырехвалентен. Само собой разумеется, что атом водорода одновалентен. Из этого следует, что атом кислорода может присоединить к себе два атома хлора, образуя соединение $Cl_2O$, атом углерода— четыре атома хлора, образуя вещество $CCl_4$, или два атома кислорода, образуя соединение $CO_2$. Существуют элементы, атомы которых обладают более высокими валентностями. Вот пример соединений таких атомов: пятихлористый фосфор $PCl_5$, трехокись серы $SO_3$, четырехокись осмия $OsO_4$.

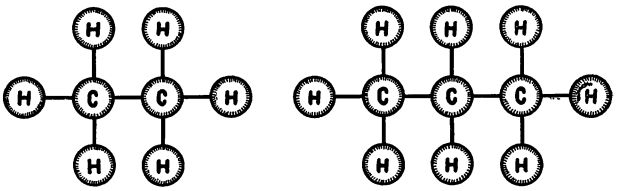


Если взять такие количества водорода и хлора, которые будут эквивалентны их относительным атомным весам, то, имея в виду, что оба эти элемента одновалентны, можно попытаться соединить эти количества друг с другом. Действительно, при сильном освещении хлор и водород соединяются именно в таких отношениях без остатка, образуются молекулы хлористого водорода HCl. Подобным же образом реагируют водород с кислородом, если их количества соответствуют отношению двух атомов водорода к одному атому кислорода. Если на такую смесь воздействовать электрической искрой или губчатой платиной, образуется вода.

Зная состав даже такого сравнительно сложного соединения, как серная кислота, и валентности составляющих ее элементов, можно предположить, что она образуется соединением одной молекулы воды и одной молекулы трехокиси серы. Водород одновалентен, кислород двухвалентен, а сера шестивалентна.

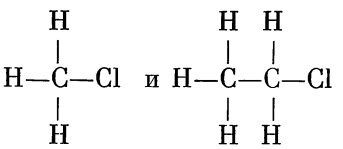
Гораздо сложнее построить или синтезировать органические молекулы. В их состав всегда входят углерод и водород, часто — кислород и азот, иногда — сера или фосфор, хлор, бром или йод, а также металлы. Валентность углерода, водорода, кислорода и азота выражается небольшими числами. Казалось бы, что это не должно усложнять построение органических молекул. Однако у органических соединений есть одна особенность, которая и делает эту задачу очень трудной. Четырехвалентные атомы углерода могут соединяться друг с другом, образуя прямые или разветвленные цепочки либо кольчатые образования. При этом число атомов углерода, принимающих участие в формировании таких молекул, практически неограниченно, следовательно, число органических соединений, или соединений углерода, чрезвычайно велико и во много раз превышает число известных соединений всех других элементов, вместе взятых (см. ст. «Органические вещества вокруг нас»). Знать структуру и строение молекулы — обязательное условие ее синтеза.

Простейшее органическое соединение — метан $CH_4$ состоит из углерода и водорода. Его ближайшие соседи — этан $C_2H_6$ и пропан $C_3H_8$. Помня о валентности атомов углерода и водорода и о способности атомов углерода образовывать цепочки, можно прийти к единственно возможным формулам строения этих соединений:



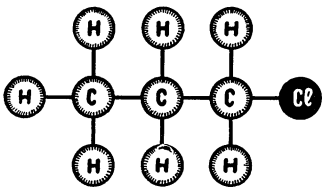
Легко можно составить и формулы строения более сложных углеводородов, в молекулах которых содержится 4, 5, 6 и более атомов углерода и соответствующее число атомов водорода.

Как же построены органические молекулы, в состав которых, кроме углерода и водорода, входит атом хлора, например хлористый метил $CH_3Cl$ и хлористый этил $C_2H_5Cl$? Для этих соединений, очевидно, можно написать только такие формулы:

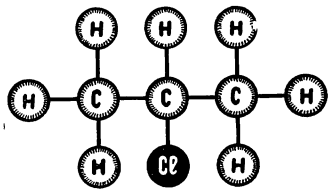


Каждая формула показывает, что эти соединения получились при замене одного атома водорода в молекулах метана и этана на атом хлора, причем в данном случае безразлично, какой из атомов водорода замещен атомом хлора.

Однако в молекуле, содержащей три атома углерода, т. е. в хлористом пропиле $C_3H_7Cl$, это уже небезразлично. Для этого соединения существуют две формулы в зависимости от того, у какого из углеродных атомов водород замещен на хлор.



Хлористый пропил



Хлористый изопропил

Они отличаются друг от друга не только строением, но и физическими и химическими свойствами. Вещества, подобные хлористому пропилу и изопропилу, т. е. состоящие из одинакового числа атомов одних и тех же элементов, называются изомерами, а явление изомерии—одна из причин большого числа органических соединений, известных в настоящее время.

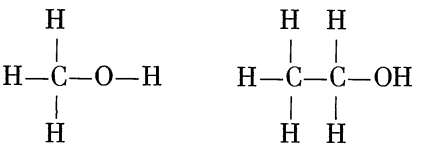
Обратимся к несколько более сложным примерам органических соединений, например к органическим спиртам. Простейшие представители этого класса — метиловый спирт $CH_4O$ и этиловый спирт $C_2H_6O$. Их состав таков, как будто они получились присоединением одного атома кислорода к углеводородам метану $CH_4$ и этану $C_2H_6$. Однако такое предположение противоречило бы четырехвалентности углерода.

О том, как построены эти молекулы, можно судить по некоторым их превращениям. Оказывается, что в каждом из этих спиртов не все атомы водорода ведут себя одинаково: в их молекулах имеется по одному атому водорода, способному выделяться при действии металлического натрия:

$$CH_4O + Na \rightarrow H + CH_3ONa \text{ и}$$
$$C_2H_6O + Na \rightarrow H + C_2H_5ONa.$$

Кроме того, при определенных условиях в молекулах этих спиртов хлором заменяется не атом водорода, как в углеводородах $CH_4$ и $C_2H_6$, а группа атомов OH. При этом образуются знакомые уже нам хлористый метил $CH_3Cl$ и хлористый этил $C_2H_5Cl$.

Эти превращения позволяют построить формулы строения метилового и этилового спирта:

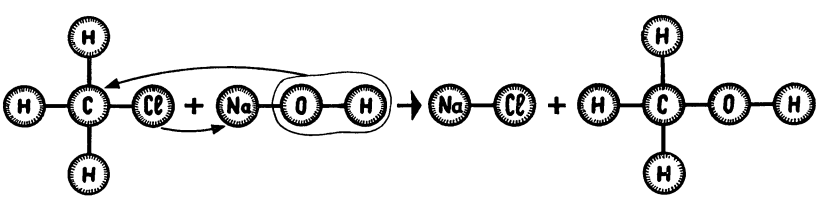


В этих формулах валентности H, O и C, о которых мы говорили выше, соблюдены, и в то же время один атом водорода, в отличие от всех остальных, соединен не непосредственно с атомом углерода, а через атом кислорода. Очевидно, этим и объясняется его способность легко заменяться металлом или вместе с кислородом при определенных условиях уступать место хлору.

Попробуем теперь, зная строение молекул этих спиртов, построить, или синтезировать, их. Долгое время метиловый спирт получали разлагая древесину нагреванием, а этиловый (винный) спирт и сейчас еще получают при спиртовом брожении крахмала, содержащегося в картофеле или злаках. Оба пути очень сложны.

Как химик приступает к построению молекул нужной структуры? Очевидно, так же, как и любой строитель, т. е. прежде всего он составляет план строительства, иначе говоря, составляет архитектурную схему здания и намечает, из каких строительных элементов он будет создавать целое. Но современный строитель применяет уже не отдельные кирпичи, а целые готовые блоки, из которых легче сложить здание. Так поступает и химик. Для построения желаемой молекулы он берет готовые полупродукты известного строения и комбинирует их.

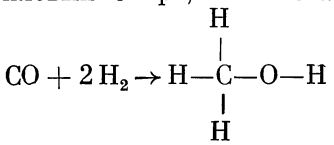
Для синтеза метилового спирта, очевидно, было бы целесообразно взять такие вещества, в которых уже есть готовая группа $CH_3$ и группа OH. Такие вещества известны: это, например, хлористый метил $CH_3Cl$ и едкий натр NaOH. Реакция между ними дает метиловый спирт:



По такой же схеме можно получить и этиловый спирт. Но это не единственные пути для синтеза метилового и этилового спирта. Промышленные способы их синтеза совсем иные. В них учтены требования технологии и экономики производства. Метиловый спирт получается из

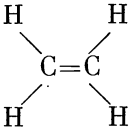
доступной окиси углерода и водорода. Эту смесь, или «водяной газ», можно образовать действием нагретого до высокой температуры водяного пара на уголь: $C+H_2O \rightarrow CO+H_2$.

Если прибавить к ней один объем водорода и пропустить новую смесь при высокой температуре и под высоким давлением через соответствующий катализатор, то получится синтетический метиловый спирт, или метанол:

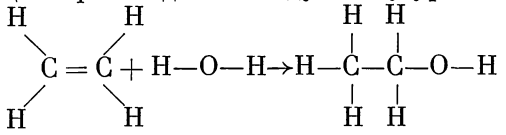


Три атома водорода присоединились к атому углерода, а один атом водорода — к кислороду.

Промышленный синтез этилового спирта осуществляется при высокой температуре и в присутствии катализатора. Водяным паром действуют на газообразный этилен $C_2H_4$, выделяемый из газов крекинга нефти. В молекуле этилена два атома углерода соединены так называемой двойной связью:



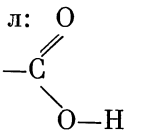
Реакция происходит по следующему уравнению:



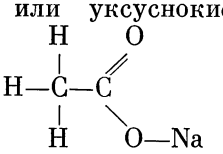
Один водородный атом воды присоединился к первому углероду этилена, а гидроксильная группа воды OH — ко второму.

Как же синтезируются более сложные молекулы? Важный класс органических соединений — кислоты. Подобно спиртам, они состоят из углерода, водорода и кислорода, но в молекуле кислоты содержится на два атома водорода меньше и на один атом кислорода больше, чем в молекуле спирта с тем же числом атомов углерода. Сравним состав молекул винного спирта $C_2H_6O$ и уксусной кислоты $C_2H_4O_2$. Возникает предположение, что уксусную кислоту можно получить из винного спирта, заменяя в нем два атома одновалентного водорода на один атом двухвалентного кислорода путем окисления либо с помощью бактерий уксуснокислого брожения, либо при действии окислителей:

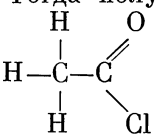
Подобным же образом можно получать и другие органические кислоты из соответствующих спиртов с тем же числом атомов углерода. Для всех этих кислот будет характерна так называемая карбоксильная группа, или карбоксил:



В ней один атом водорода связан, как и в спиртах, с кислородом; поэтому он легко замещается на металлы, образуя соли. У натриевой соли уксусной кислоты, или уксуснокислого натрия, такое строение:

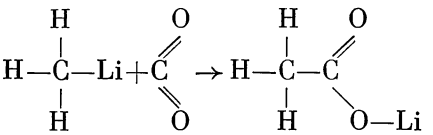


Группа атомов — O — H в уксусной кислоте и в других кислотах, точно так же как и в спиртах, может быть заменена в соответствующих условиях хлором. Тогда получится соединение:

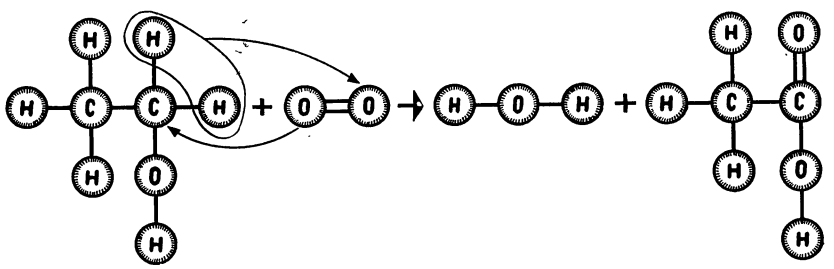


Оно называется хлорангидридом кислоты (в данном случае уксусной).

Сравнивая состав уксусной кислоты $C_2H_4O_2$ и метана $CH_4$, мы видим, что уксусная кислота отличается от метана одним атомом углерода и двумя атомами кислорода, а это молекула углекислого газа. Нельзя ли соединить непосредственно метан с углекислым газом, чтобы получить уксусную кислоту? К сожалению, этого сделать не удается. Но можно сделать так:



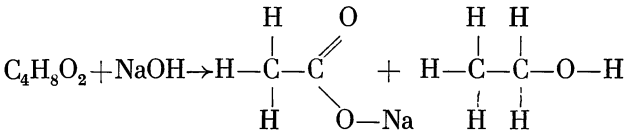
т.е. в метане заместить атом водорода атомом одновалентного металла, например лития. Такое металлоорганическое соединение легко реагирует с углекислым газом и дает уксуснокислый литий.



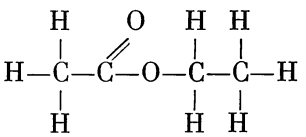
Как видим, и в классе органических кислот возможен, как говорят, «направленный синтез», т. е. построение молекул определенной структуры по заранее составленному плану. Синтез кислот — лишь отдельные, наиболее простые примеры такого построения. Кислоты любой сложности и любой структуры могут быть синтезированы с помощью рационально подобранных последовательных реакций.

Сложные эфиры, имеющие близкое отношение к спиртам и кислотам, широко распространены в природе — в растительном и животном мире. Летучие сложные эфиры обладают приятными запахами и встречаются в растительных эфирных маслах. Все жиры — растительные и животные — принадлежат к классу сложных эфиров. Сюда же относятся различные виды пчелиного воска, содержащие 55—65 атомов углерода в молекулах.

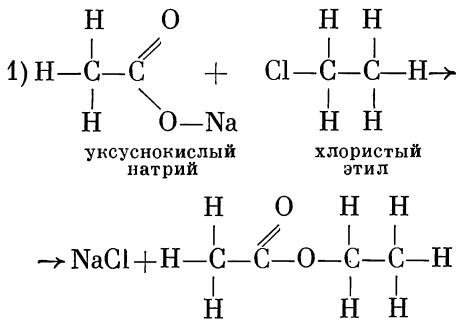
Сложные эфиры при нагревании с едким натром превращаются в натриевую соль кислоты и спирт. При реакции уксусноэтилового эфира $C_4H_8O_2$ образуются уже знакомые нам уксуснокислый натрий и этиловый (винный) спирт:

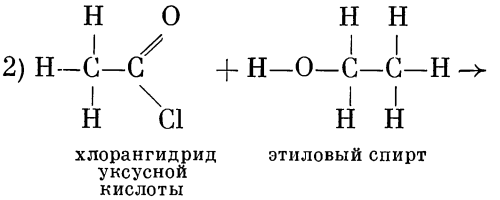


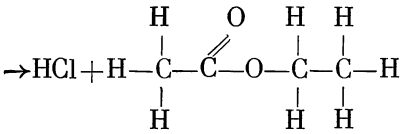
Если мысленно отнять от полученных соединений элементы едкого натра, а оставшиеся части молекул соединить друг с другом, то, очевидно, получится молекула исходного уксусноэтилового эфира:



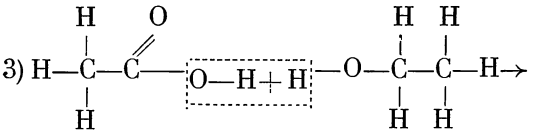
Построить такую молекулу можно различными способами:

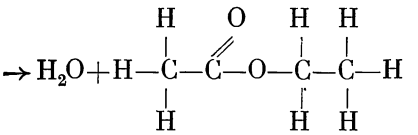


Оба способа действительно приводят к цели, но на практике уксусноэтиловый эфир получают из смеси уксусной кислоты и этилового спирта, нагревая ее с концентрированной серной кислотой:





Перечисленными реакциями, конечно, не ограничиваются все возможные пути построения сложных эфиров. Такие пути меняются в зависимости от состава и строения кислоты и спирта, сложности их молекул и т. д.

Вообще задача построения нужных молекул не так проста, как может показаться при рассмотрении всех приведенных выше примеров. Иногда десятилетиями ищут удобный и доступный путь для синтеза того или иного вещества. Требуется большое количество промежуточных реакций, чтобы окончательное решение было удачным. Тем не менее в настоящее время химики научились синтезировать очень многие из встречающихся в природе соединений, иногда с очень сложным составом и строением.

### Сергей Васильевич Лебедев (1874—1934)

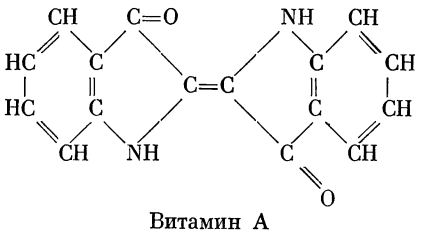
**Выдающийся советский химик-органик. Замечательный исследователь процессов полимеризации. По заданию Советского правительства академик Лебедев создал первый промышленный способ приготовления искусственного каучука (1932). Благодаря его работам наша Родина освободилась от иностранной зависимости и от огромных затрат на импорт натурального каучука, который так необходим народному хозяйству — от автомобильных шин до галош и детских мячей.**

СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЛЕБЕДЕВ

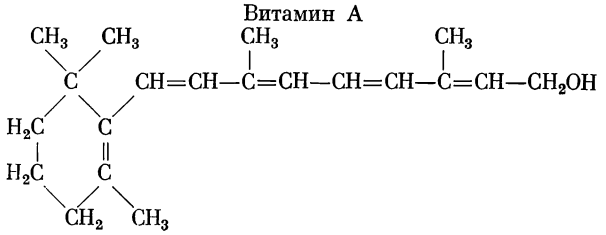
ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ КУРЧАТОВ

В наше время сложные природные соединения успешно синтезируют в лабораториях и даже на заводах.

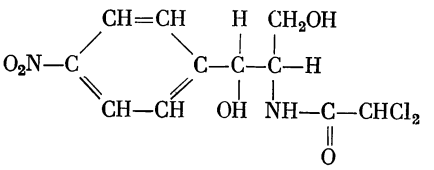
Краситель индиго



Витамин А



Антибиотик левомицетин



В лабораториях и в промышленности синтезируются, кроме того, многочисленные соединения, не встречающиеся в живой природе. Химики получают в полном смысле слова искусственные материалы.

Строение таких материалов обычно очень сложно, а их свойства, в том числе и механические, часто превосходят свойства самых ценных природных материалов.

# ПОЛИМЕРЫ

## ДЛЯ ЧЕГО НУЖНЫ ПОЛИМЕРЫ

Слово «полимеры» за последние годы прочно вошло в наш язык наряду с такими понятиями, как «атомная энергия», «радиоэлектроника», «термоядерная реакция», «космические полеты». Все эти слова олицетворяют наиболее выдающиеся достижения науки и техники сегодняшнего дня.

Полимеры, или, как их еще называют, высокомолекулярные соединения, изучает и создает химия, развитию которой придается важное значение. Химия полимеров призвана сыграть немаловажную роль в построении материально-технической базы коммунизма.

Наша земля богата полезными ископаемыми, и сырьевой голод нам не угрожает. Но наука уже сегодня вынуждена вести поиски новых источников сырья, доступных и неисчерпаемых, вести поиски веществ дешевых и универсальных, таких, которые могли бы заменить и превзойти по своим качествам металлы, древесину, пищевое сырье, используемые в технических целях.

### Игорь Васильевич Курчатов (1903—1960)

**Ученый-коммунист. Академик. Сын уральского лесничего. Замечательный физик нашего времени. Научные интересы ученого И. В. Курчатова были широки и многообразны. Он открыл новый обширный класс явлений в области электрических свойств твердого тела, названный им сегнетоэлектричеством. Это новая область науки с большой технической перспективой. В период Отечественной войны он разработал принципы защиты кораблей от магнитных мин. Тысячи советских моряков обязаны жизнью расчетам ученого.**

**Больше всего Игоря Васильевича интересовала проблема атомного ядра. Она стала целью всей его жизни. Ему принадлежит открытие явления ядерной изомерии. Под руководством Курчатова было открыто самопроизвольное деление урана. Он возглавил в нашей стране работы по созданию первого атомного реактора, первой в мире атомной электростанции, первого в мире атомного корабля — ледокола «Ленин». Академик Курчатов и его ученики первыми открыли для человечества путь к овладению неисчерпаемым источником энергии — к осуществлению реакции термоядерного синтеза. Игорь Васильевич очень много сделал для обеспечения безопасности нашей Родины, для создания атомной промышленности. Это был великий борец за мир. Он неустанно повторял: «Мирный атом — вот наша цель!»**

**За замечательные достижения в области атомной физики Родина трижды удостоила его высокого звания Героя Социалистического Труда. Его беззаветное служение народу, великая любовь к науке, самоотверженность, страстность и увлечение в работе пусть послужат примером для вас, молодые читатели Детской энциклопедии.**

Кроме того, новая техника и промышленность все чаще и чаще испытывают нужду в материалах, обладающих более высокой прочностью, твердостью, жаростойкостью и другими свойствами. Без таких материалов невозможно полностью использовать уже достигнутые в технике сверхвысокие температуры, давления и скорости, нельзя создавать более совершенные машины, которые помогут увеличить производительность труда.

Появилась острая нужда в таких веществах, которых в природе не существует. Например, не бывает прозрачных металлов, металлических изоляторов (диэлектриков) и неметаллических проводников тока, «вечных» смазок, неметаллических магнитных материалов. Что же делать, если природа «забыла» создать такие вещества, а они нам необходимы? Надо создавать их!

Этим очень трудным, но важным делом и занимается химия полимеров. Чтобы убедиться в том, какую роль эта отрасль человеческих знаний играет в жизни людей, достаточно лишь оглянуться вокруг. Наверняка из всех попавшихся на глаза предметов большинство будет продуктами химии, а из них добрая половина — химии полимеров. Сегодня без химии немыслим никакой прогресс, невозможно развитие буквально всех отраслей техники, науки, промышленности, быта.

Химия способна изготовить ткани более прочные, чем шелк и полотно, ткани, не боящиеся действия химических веществ, обладающие целебными свойствами. Только она может создавать материалы, которые не растворяются ни в одной из самых крепких кислот и щелочей, выдерживают нагрев, при котором любые природные органические вещества обугливаются и сгорают. Только с помощью химии можно получить жидкости и масла, не замерзающие при самом лютом морозе и не теряющие своих свойств в настоящем пекле.

Лишь химия полимеров способна создать материалы прочнее стали, легче пробки, эластичнее и выносливее природного каучука, долговечнее дерева и камня.

Создаваемые химией искусственные меха дешевле, красивее, прочнее, легче, теплее и износоустойчивее, чем меха редких и дорогих пушных зверей. Даже в медицине начинают использовать полимеры — вещества, заменяющие кровь, кости и ткани человеческого организма.

И все эти необыкновенные материалы рождаются в лабораториях ученых и производятся на химических заводах из угля, нефти, природных газов, сланцев, древесных отходов.

Поясним, что вещества, получаемые путем химической переработки природных полимеров, например вискозное волокно из целлюлозы, называют искусственными, а изготовляемые совершенно заново — синтетическими.

Сейчас человечество вступило в век атомной энергии. Ученые ищут пути управления термоядерной реакцией. Когда эта важнейшая задача будет решена — а ее решение, видимо, не за горами,— забота о неиссякаемых источниках энергии, которые понадобятся людям коммунистического будущего, будет снята с них навсегда. И тогда вся огромная масса ныне добываемого ископаемого топлива — угля, нефти, природных газов, сланцев — поступит целиком в распоряжение химиков для производства бесконечного разнообразия самых удивительных вещей. Человечество получает возможность исправить вековую несправедливость, о которой в свое время говорил Д. И. Менделеев: «Сжигать нефть все равно, что топить печь ассигнациями».

Вот почему в создании материально-технической базы коммунистического общества в числе важнейших ее основ признана и химия полимеров.

## РОДОСЛОВНАЯ БОЛЬШИХ МОЛЕКУЛ

Все окружающие нас вещества состоят из атомов, которые в ходе самых разнообразных химических реакций соединяются, собираясь в молекулы — группы из десятков, а иногда из сотен атомов. Только немногие атомы, главным образом атомы углерода, способны соединяться в длинные цепочки из десятков и сотен тысяч атомов. Вещества, состоящие из таких гигантских цепочек, и называются полимерами.

Химики приложили немало усилий, чтобы разгадать тайны строения гигантских молекул, хотя это было по существу дерзким вызовом природе. Ведь вслед за этим можно перейти к воспроизведению природных веществ искусственным путем, а затем и к созданию подобных им новых веществ, которых в природе не существует.

Разработанная русским ученым А. М. Бутлеровым структурная теория позволила определить строение и «разложить по полочкам» сотни тысяч органических веществ — от простейшего болотного газа (метана) до змеиного яда и белка. Многочисленная армия химиков-органиков начала искать способы производства

искусственным путем не слишком сложных органических веществ — красителей и лекарств. Это и привело в конце концов к зарождению «химии больших молекул».

В конце XIX в. ученые установили химический состав целлюлозы, каучука и некоторых белков. Оказалось, что эти вещества, как и большинство других органических соединений, состоят из очень немногих видов атомов — углерода, азота, водорода, серы, кислорода. Но за этой простотой скрывалась масса всевозможных сюрпризов. Так, целлюлоза, вещество совершенно неплавкое и почти ни в чем не растворимое, оказалось сходным по химическому составу с легко растворимым и плавящимся сахаристым веществом — глюкозой.

Химикам стало ясно, что секрет противоположных свойств кроется не столько в химическом составе этих веществ, сколько в **размерах** и **строении** их молекул. Способность органических веществ растворяться и плавиться уменьшается по мере увеличения количества атомов в их молекулах. Этим же, в частности, объясняется высокая механическая прочность природных волокон хлопка (целлюлоза), шерсти (белок), шелка и ... паутины.

Молекулы этих волокон очень длинные. А так как в их состав входит ограниченное количество видов атомов, то химики пришли к выводу, что длинные молекулы образуются из периодически повторяющихся и сравнительно небольших «кирпичиков». Такие молекулы-«кирпичики» были названы м о н о м е р а м и («моно» — единственный, один). Длинная молекула целлюлозы $(C_6H_{10}O_5)_n$ представляет собой цепочку, содержащую до 10 тыс. звеньев. Каждое звено — это молекула глюкозы $C_6H_{12}O_6$, у которой отнята молекула воды $H_2O$, благодаря чему и произошло соединение молекул в цепочку. Молекула природного каучука сложилась из непрерывно повторяющихся молекул углеводорода изопрена $C_5H_8$, сцепившихся друг с другом за счет разрыва двойных связей. Мономер — одно звено, полимер — много повторяющихся звеньев.

Ученые еще не вполне понимали структуру природных полимеров, но это уже не мешало им получать искусственные высокомолекулярные вещества. Были найдены способы превращения целлюлозы в целлулоид, в ацетатный шелк, порох, кинопленку, красивые блестящие лаки и краски.

В начале XIX в. был открыт способ превращения природного каучука в резину путем его вулканизации. При нагревании каучука в присутствии серы звенья его длинных молекул скрепляются между собой как бы перемычками из атомов серы. Это придает каучуку необычную прочность и эластичность. Главным потребителем резины стала бурно развивающаяся с начала XX в. автомобильная промышленность. И в настоящее время она поглощает более 85% резины, производимой в мире.

## ПЕРВЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ ПЛАСТМАССЫ

В науке всегда находились ученые, заглядывавшие на десятилетия, а иногда и на века вперед. Великий русский химик А. М. Бутлеров в середине XIX в. первым разработал те основные принципы, на которых впоследствии были основаны методы получения полимеров из низкомолекулярных органических соединений. Эти работы оказали огромное влияние на дальнейшее развитие химии полимеров.

Еще в 1909 г. С. В. Лебедев связал молекулы бутадиена — газообразного продукта, вырабатываемого из спирта,— в длинные цепочки и получил полимер, сходный с естественным каучуком. Но организовать промышленное производство синтетического каучука (СК) в России удалось лишь после Великой Октябрьской социалистической революции, в 1932 г.

В начале XX в. резко изменилось отношение химиков к некоторым веществам, до этого только загрязнявшим лабораторную посуду. Молодой бельгийский химик Л. Бакеланд, работавший в США, заинтересовался вязкой жидкостью, образующейся в результате реакции между давно известными органическими веществами — фенолом и формальдегидом, растворенными в воде. Однажды, нагревая эту смесь под давлением, он получил твердое и прозрачное вещество, которое прекрасно выдерживало высокую температуру, было очень устойчиво к действию химических веществ, хорошо противостояло механическому износу, не боялось влаги и в довершение всего оказалось великолепным изолятором электрического тока. Новый материал в честь его создателя был назван б а к е л и т о м. Бакелит стал первым продуктом новой отрасли промышленности — индустрии пластических масс.

Нагревая под давлением формальдегид с мочевиной или анилином, химики получили ряд пластмасс уже с иными, чем у бакелита, свойствами. Из этих первых промышленных полимеров, созданных, так сказать, на ощупь, изготов-

ляли различные предметы, применяемые в быту и в промышленности. Но законов, управляющих их образованием и поведением, никто из первых исследователей не открыл. Встал вопрос не только о том, **как** изготовлять те или иные изделия, но и **почему** они получаются такими. Без этого нельзя было создавать новые, еще более совершенные материалы, уменьшать стоимость, расширять области их применения. Изучением полимеров нужно было заняться глубоко и всесторонне.

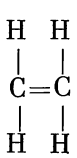
## КАК ПОЛУЧАЮТСЯ МОЛЕКУЛЫ-ГИГАНТЫ

Одно дело — разгадать, как устроен природный полимер, а другое — искусственно воспроизвести его или похожий на него полимер, т. е. «сковать» составляющие его звенья в нужную длинную цепочку.

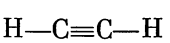
Химик, совершающий такое волшебство, чем-то напоминает строителя. Но вместо одинаковых и реально осязаемых кирпичей у химика множество невидимых кирпичиков и даже целые готовые блоки из них самой различной величины и формы, образованные из молекул исходных органических веществ — мономеров.

Не все органические вещества способны образовывать полимеры. Органические соединения, состоящие лишь из атомов углерода, обрамленных с нескольких сторон атомами водорода, называют предельными или насыщенными углеводородами. Это означает, что сами по себе молекулы этих веществ соединяться в еще более длинные цепочки не могут.

Однако в молекулах некоторых углеводородов атомы углерода связаны между собой двойными и даже тройными связями. Такие углеводороды называют непредельными или ненасыщенными. В химическом отношении они намного активнее насыщенных. Таковы, например, газы:



этилен
$C_2H_4$



ацетилен
$C_2H_2$

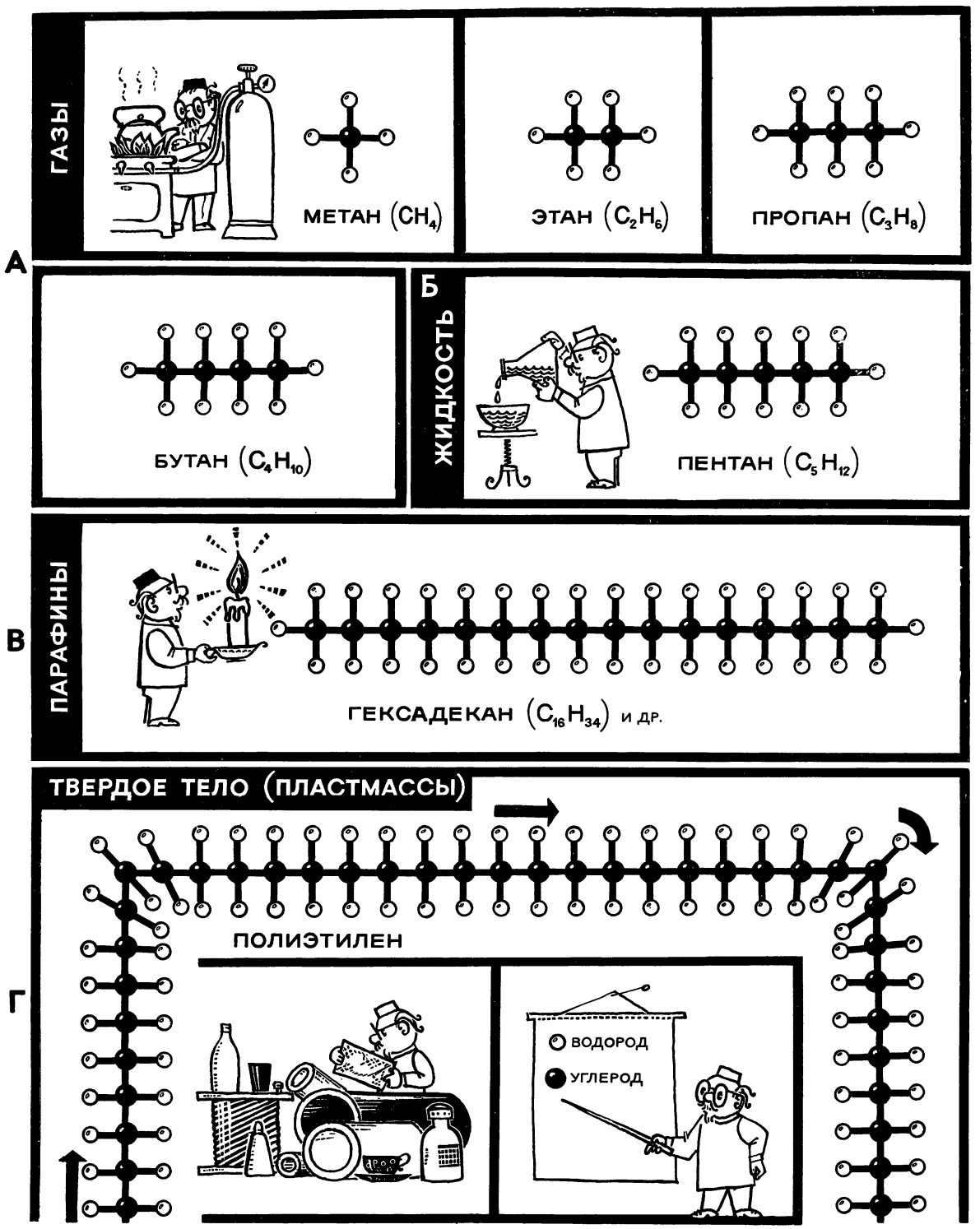
Особенность молекул непредельных углеводородов заключается в том, что при определенных условиях одна из связей между атомами углерода может быть разорвана, и тогда молекула приобретает способность присоединять к себе одну за другой множество таких же молекул. Образуется одна гигантская молекула-цепочка, состоящая из нескольких десятков и сотен тысяч метиленовых групп $CH_2$. Таким путем появился на свет полиэтилен. Из газа возникает твердое вещество, обладающее большой механической прочностью.

Благодаря своим исключительным свойствам в промышленности, изготовляющей электрические кабели и провода, 1 *т* легкого полиэтилена заменяет 3 *т* очень дорогого свинца. Из полиэтилена можно изготовлять и всевозможную тару: химическую, обычную посуду и даже огромные цистерны для перевозки жидкостей. Полиэтилен — отличный материал для футеровки(облицовки) изнутри металлических труб, применяемых для перекачки кислот и других жидкостей, разъедающих металлы. Там, где стальные трубы приходилось менять каждые два месяца, трубы, облицованные изнутри полиэтиленом, служат больше трех лет.

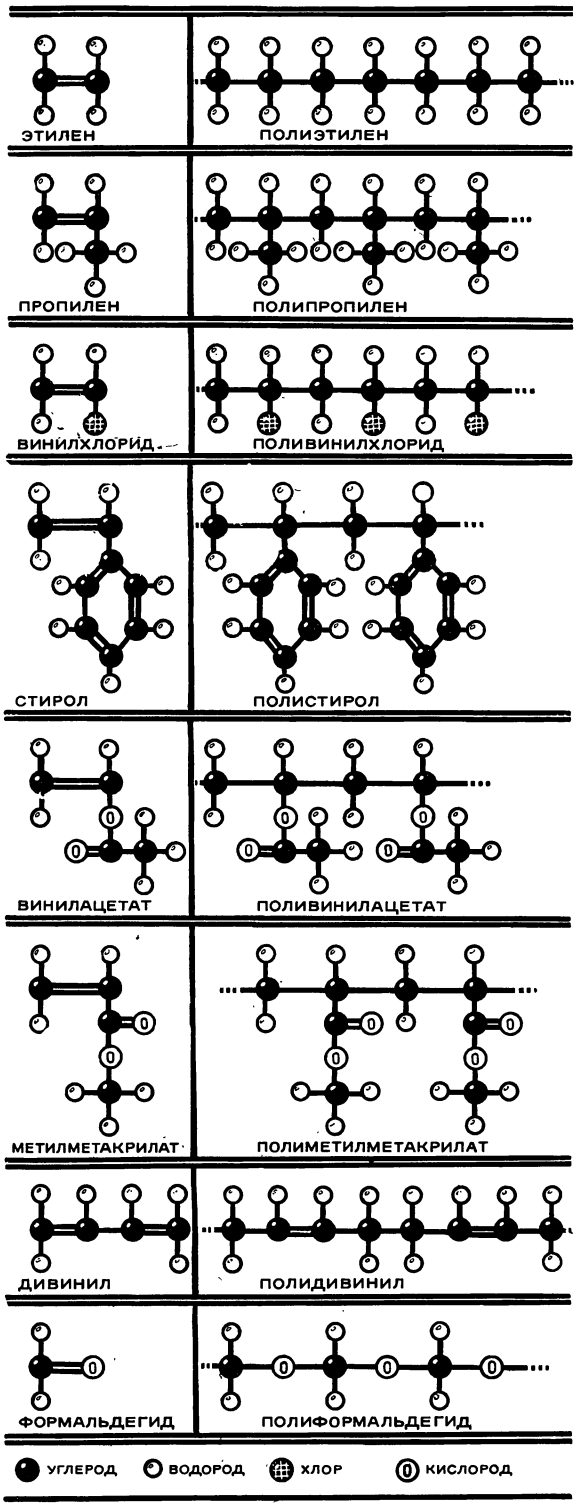
Из полиэтилена изготовляют и сплошные трубы — прочные, гибкие, практически «вечные». Трудно даже подсчитать, какое количество газовых, водопроводных и иных металлических труб можно будет заменить на более стойкие и дешевые — пластмассовые. Можно представить себе машину будущего, которая на ходу роет траншею, тут же отливает полиэтиленовую трубу, укладывает ее на место и засыпает землей. Вот почему ускоренному развитию производства полиэтилена в нашей стране сейчас уделяется огромное внимание.

Из полимеров — молекул-цепочек — состоят и все клетки живой материи — растений и животных. Вот перед нами дерево. Целлюлоза— главная составная часть древесины — полимер. Мясо и шерсть животных — полимеры. Углеводы и белки зерновых злаков — тоже полимеры. Волокна хлопка, шелка, смола растений и многих других природных веществ — все это представители великой семьи полимеров. Миллионы лет природные гигантские молекулы, или полимеры, обеспечивали человека пищей, одеждой, теплом, кровом.

Свои величайшие богатства природа создавала из очень сложных молекул. Эти невероятно тонкие структуры, выработанные в процессе развития живой материи, наделены бесконечным разнообразием свойств и качеств. Человек просто брал от природы все эти блага готовыми. Высокомолекулярные соединения довольно долго представляли для химиков загадку, «книгу за семью печатями». Когда же во всеоружии




Способностью соединяться в длинные цепочки (полимеры) обладают атомы углерода, обрамленные с нескольких сторон атомами водорода, так называемые углеводороды. Если в такой молекуле содержится менее пяти атомов углерода, то вещество обычно имеет газообразную форму (*А*); от 5 до 11 атомов углерода — это уже жидкости (*Б*); более 12 атомов углерода — твердые вещества, например парафины (*В*). Цепочки из десятков и сотен тысяч атомов углерода образуют высокопрочные пластические вещества, например полиэтилен (*Г*).

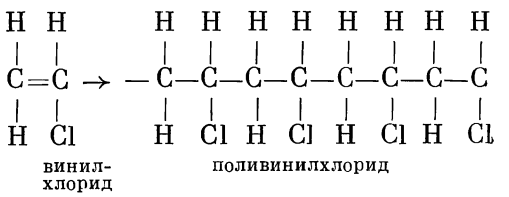



**Важнейшие мономеры и соответствующие им полимеры.**

приобретенного веками опыта они начали исследовать вещества, из которых состоит органический мир, перед ними открылись неисчерпаемые и необъятные просторы. Свыше двух миллионов химических соединений знают теперь химики-органики, и это количество увеличивается буквально каждый день.

Как мы уже говорили, простейшим мономером является этилен. Некоторые из мономеров — те же молекулы этилена, в которых один из атомов водорода замещен каким-либо другим атомом или группой атомов.

Если в молекуле этилена один из четырех атомов водорода заменен атомом хлора, то получается уже другой мономер — винилхлорид, из которого образуется полимер поливинилхлорид, — материал, имеющий тысячи применений.




По сравнению с полиэтиленом поливинилхлорид обладает меньшей горючестью, большей жесткостью и высокой механической прочностью, особенно при ударных нагрузках. Из пропитанной им ткани изготовляют прочные ремни для шахтных транспортеров, плитки для полов, водопроводные трубы и множество других изделий. Поливинилхлорид заменяет металлы. 1 *m* этого полимера сберегает 6 *m* стали.

В южных районах, особенно в Средней Азии, вода ценится на вес золота. Для орошения полей вода поступает через сильно разветвленную сеть ирригационных сооружений. При этом значительная часть воды просачивается сквозь стенки многочисленных каналов и уходит в землю, не дойдя до посевов. Но если стенки каналов выстлать тонкой поливинилхлоридной пленкой, утечка воды практически прекратится.

Замена в этилене одного из атомов водорода группой CN приводит к образованию мономера акрилонитрила. Из него получается полиакрилонитрил — материал для изготовления синтетических волокон (орлон, нитрон, акрилан). Нити из нитрона в четыре раза прочнее натуральной шерсти. Меха, ковры, одеяла, перчатки, носки, свитера из нитрона так же теплы и мягки, как и сделанные из верблюжьей шерсти. Изделия из него после стирки не нужно гладить.

Цепочка полимера, «собранного» из многих мономеров, в свою очередь может принять уже три различные формы.

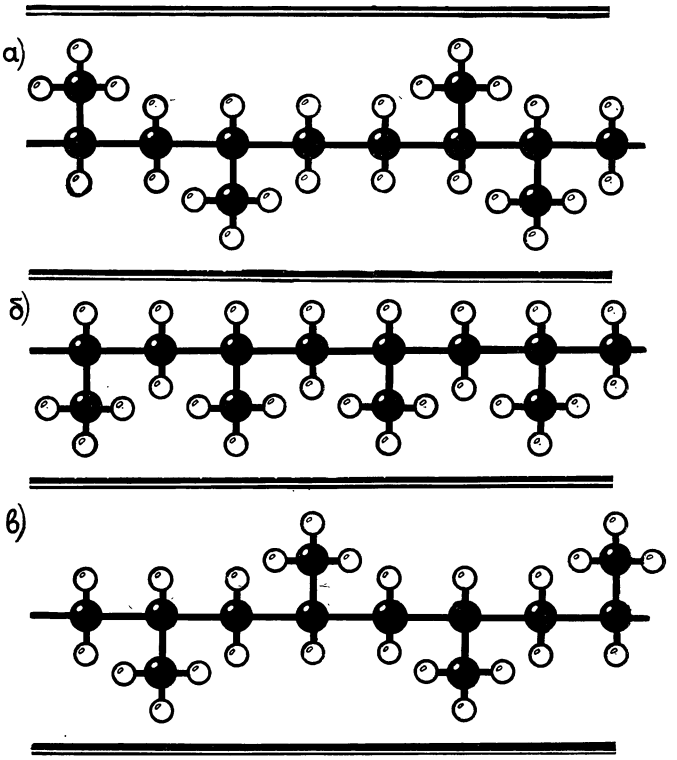
Боковые группы (Cl, CN, $CH_3$ и др.) «смотрят» в любые стороны как попало. Такие полимеры называют атактическими. Все боковые группы «направлены» в какую-либо одну сторону. Такие цепочки легко укладываются параллельно друг другу и способны образовывать полимеры, напоминающие вещества с частично кристаллической структурой. Их называют изотактическими. Наконец, полимеры, боковые группы в которых располагаются по обеим сторонам, но в каком-то определенном порядке чередования, называют синдиотактическими.

Полимеры могут состоять не из одинаковых, а из разных мономеров, которые также соединяются друг с другом в цепочки в полном беспорядке или в каком-то определенном порядке. У таких полимеров в качестве боковых отростков на месте отдельных атомов или групп атомов могут быть присоединены мономерные и даже полимерные молекулы.

Мы видим, какое огромное количество вариантов цепочек можно составить, имея в своем распоряжении столь богатые возможности, комбинировать порядок расположения атомов и групп атомов в пределах мономеров, а сами мономеры — в цепочке всего полимера! И каждое изменение в структуре полимера означает какое-то определенное изменение механических или иных его свойств.

## «ШВЕЙНАЯ ФАБРИКА» ГИГАНТСКИХ МОЛЕКУЛ

Молекулы-мономеры сами собой в длинные цепочки не соединяются. Чтобы заставить их соединяться в полимер, нужно «ввернуть» в молекулу по какому-то особому «крючочку». Для этого существуют две основные химические реакции: поликонденсация и полимеризация. Эти реакции протекают при различных условиях: одни при нагревании, другие при очень низких температурах. Приходится применять то высокие, то низкие давления и катализаторы-инициаторы. Только в результате энергичного воздействия исходные мономеры перестраиваются, расположенные на их концах атомы приобретают способность связываться, сцепляться с другими атомами, как сцепляется на сортировочной станции поезд: вагон за вагоном.

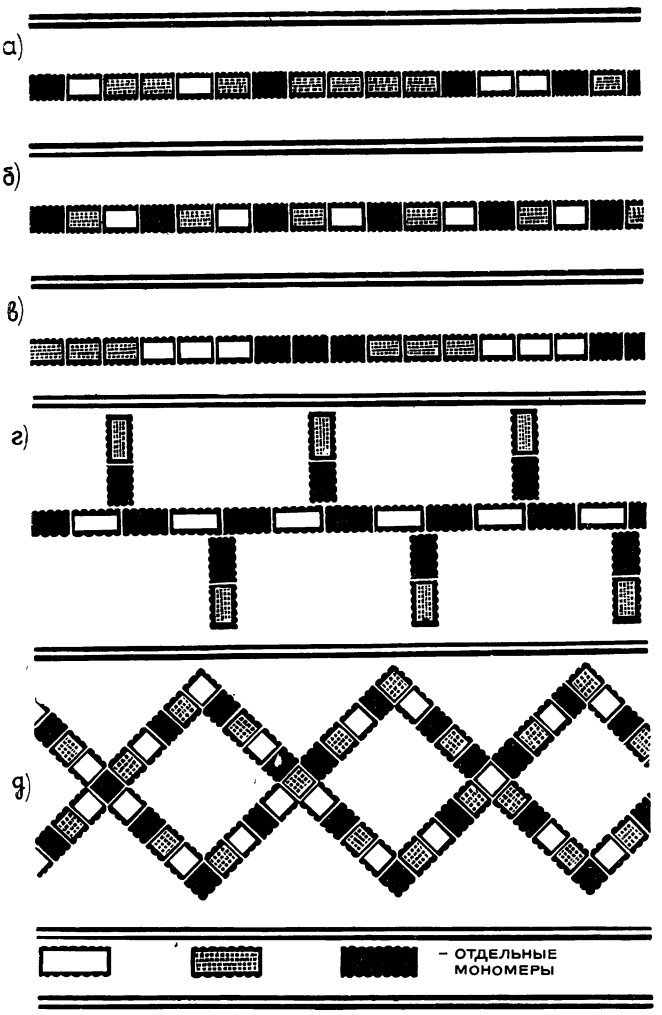



Структуры полимерных цепочек: *а*) атактические; *б*) изотактические; *в*) синдиотактические.

## ПОЛИКОНДЕНСАЦИЯ

Процесс поликонденсации — сложная химическая реакция, в ходе которой от так называемых функциональных групп, расположенных на концах мономеров, отщепляются не очень прочно удерживаемые ими отдельные атомы или даже их целые группы. Этим поликонденсация отличается от полимеризации, при которой исходные вещества превращаются в конечный продукт без всяких «отходов».

К таким функциональным группам в молекулах органических веществ относятся аминогруппа $NH_2$, от которой легко отрывается атом водорода, и карбоксильная группа COOH, от которой отрывается уже гидроксильная группа OH. Когда молекула с карбоксильной группой на одном или на обоих концах встречается с молекулой, наделенной аминогруппой, тоже на одном или на обоих концах, то отрывающийся от аминогруппы атом водорода получает возможность соединиться с группой OH, отрывающейся от карбоксильной группы. Образуется молекула воды. При этом у первой молекулы освобождается связь при атоме углерода,




**Полимерные цепочки, состоящие из мономеров, можно составлять различно: *а)* в полном беспорядке; *б)* в какой-либо строгой последовательности; *в)* группами (блоками); *г)* присоединением боковых веточек; *д)* перекрещивающимися ветвями.**

а у второй — при атоме азота. Через эти связи молекулы и получают возможность смыкаться друг с другом в длинные цепочки.

Если у каждого исходного мономера лишь одна функциональная группа, то попарным соединением друг с другом этих молекул все и кончается. Такой тип химической реакции называется конденсацией. Если же мономер содержит не менее двух функциональных групп, появляется возможность последовательного присоединения к получающейся цепочке все новых и новых звеньев. Это уже поликонденсация (рис. 1 — цв. табл.).

Поликонденсация идет сравнительно медленно и, кроме того, не позволяет «выращивать» очень длинные молекулы. К счастью, для создания многих полимеров, например нейлона, вполне достаточно молекул с молекулярным весом от 10 000 до 20 000.

Методом поликонденсации получают смолы, применяемые как связующие вещества при производстве фанеры, электроизоляционных изделий, плит и изделий из прессованных древесных опилок. Поликонденсация дает нам полимеры, из которых получаются исключительно прочные волокна — капрон и лавсан. Из капрона делают почти невесомые чулки, прочные мужские носки, шубы и многое другое. Однако большее значение имеет техническое применение капрона. Изготовленные из него морские канаты в несколько раз прочнее самых лучших пеньковых, очень эластичны и не рвутся при рывках. Рыболовные сети из капрона не намокают и не гниют. Делают из него и особенно прочную кордовую ткань для автомобильных и самолетных шин, резервуары для нефти емкостью до 600 *т*. Караваны таких «танкеров» можно буксировать по воде одним судном. Капроновые шестерни меньше изнашиваются, чем металлические, и совершенно бесшумны в работе.

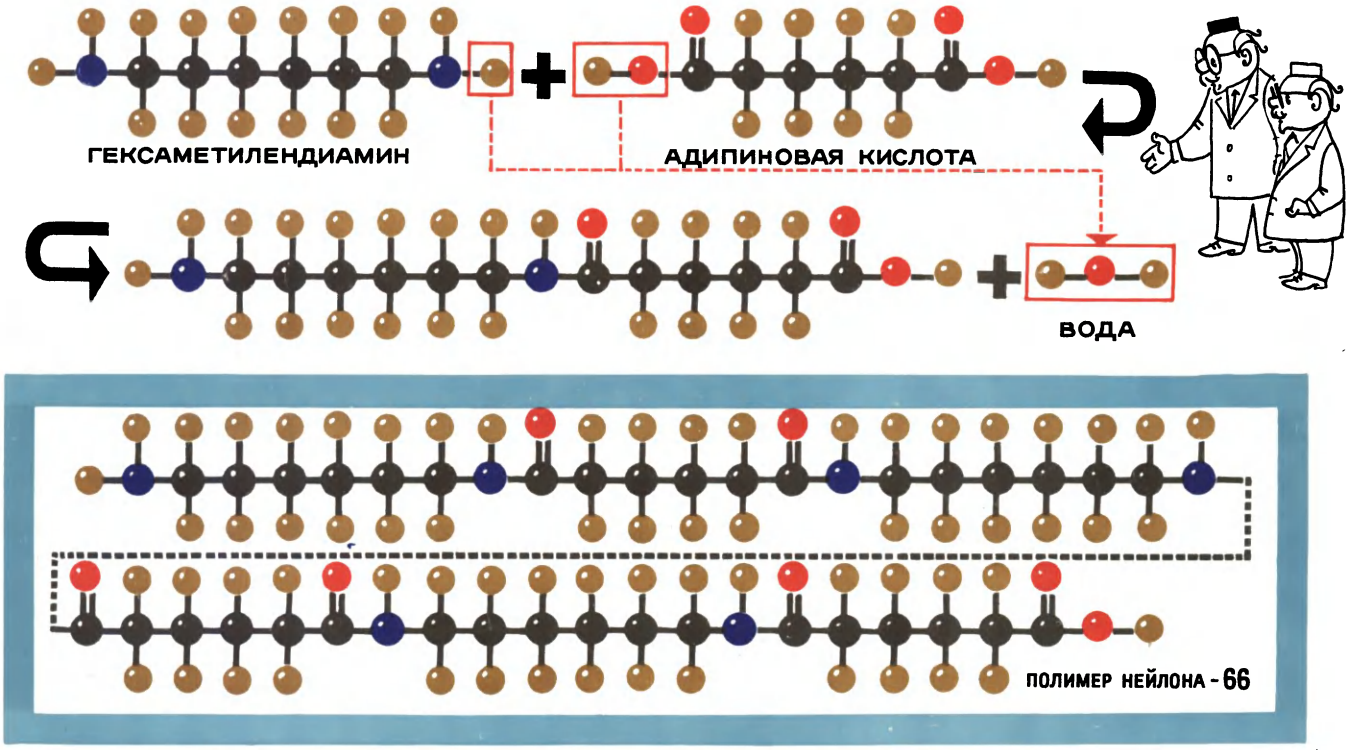
Лавсан получают из терефталевой кислоты и этиленгликоля. Это белоснежное и мягкое, как пух, шелковистое волокно, напоминает первоклассную шерсть, а по своим качествам значительно превосходит ее. Из лавсана делают высокопрочный шинный корд, невоспламеняющиеся транспортерные ленты (особенно нужны они во взрывоопасных угольных шахтах), приводные ремни, химические фильтры, изоляцию. Из него вырабатывают не пропускающие воду брезенты, пожарные рукава, складные лодки и байдарки, палатки, шланги, паруса, специальную одежду для рыбаков и трактористов.

Из лавсана получаются превосходные пленки, которые почти не пропускают газа и более

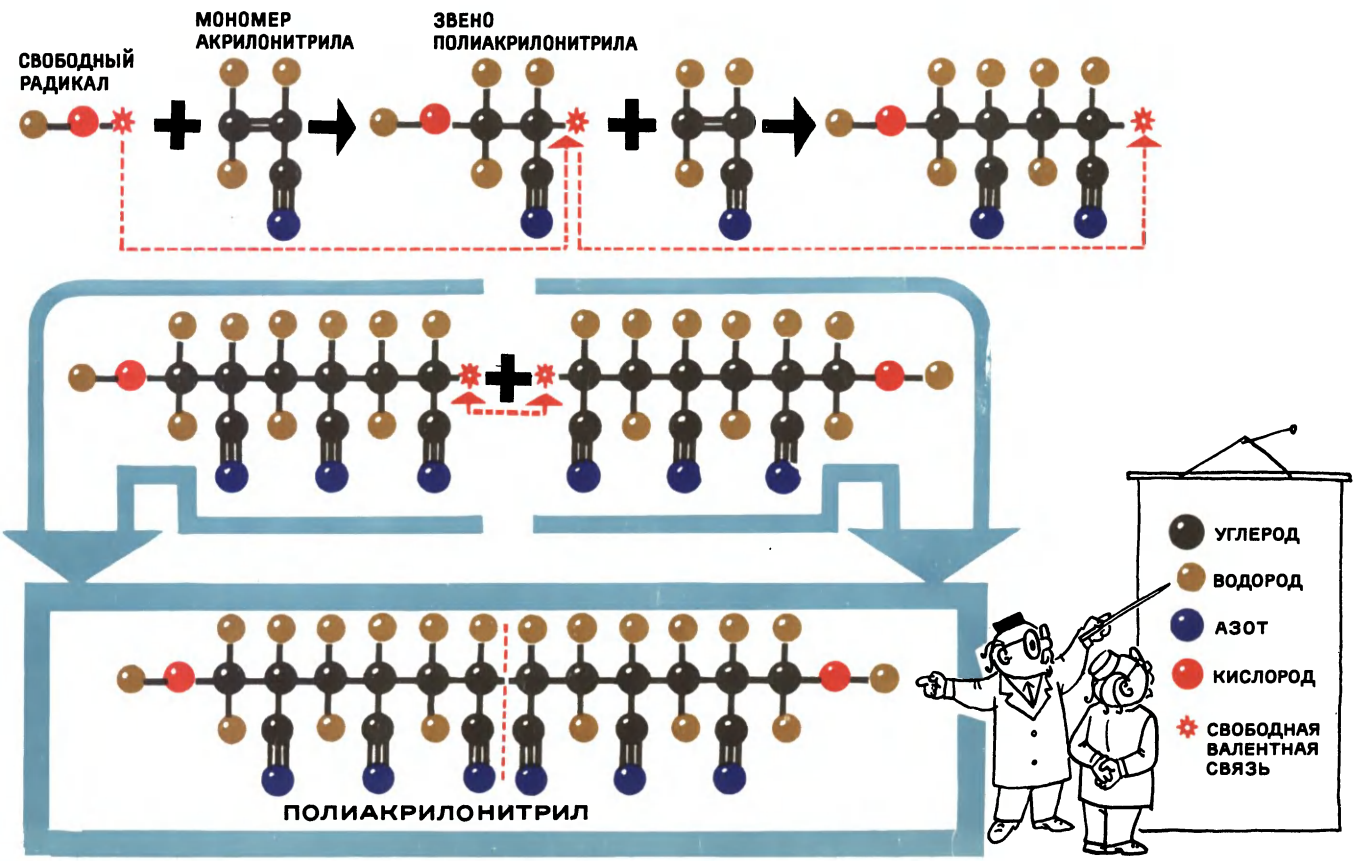
*Таблица к статье «Полимеры»*

***1.*** **Две молекулы гексаметилендиамина и адипиновой кислоты, соединяясь в цепочку, высвобождают молекулу воды Н — О — Н. В результате непрерывного роста цепочки образуется полимер нейлона-66.**
***2.*** **Свободный радикал Н — О, получаемый при расщеплении перекиси водорода, имеет одну свободную валентную связь, через которую он и соединяется с мономером акрилонитрила. При этом свободная валентная связь перемещается на конец мономера. Мономер акрилонитрила получает возможность присоединить к себе другой такой же мономер, а переместившаяся на конец этого мономера свободная валентная связь — присоединить к образующейся цепочке третий мономер и т. д. Процесс непрерывного увеличения длины цепочки мономера прекращается лишь тогда, когда две такие цепочки соединяются друг с другом своими свободными валентными связями.**

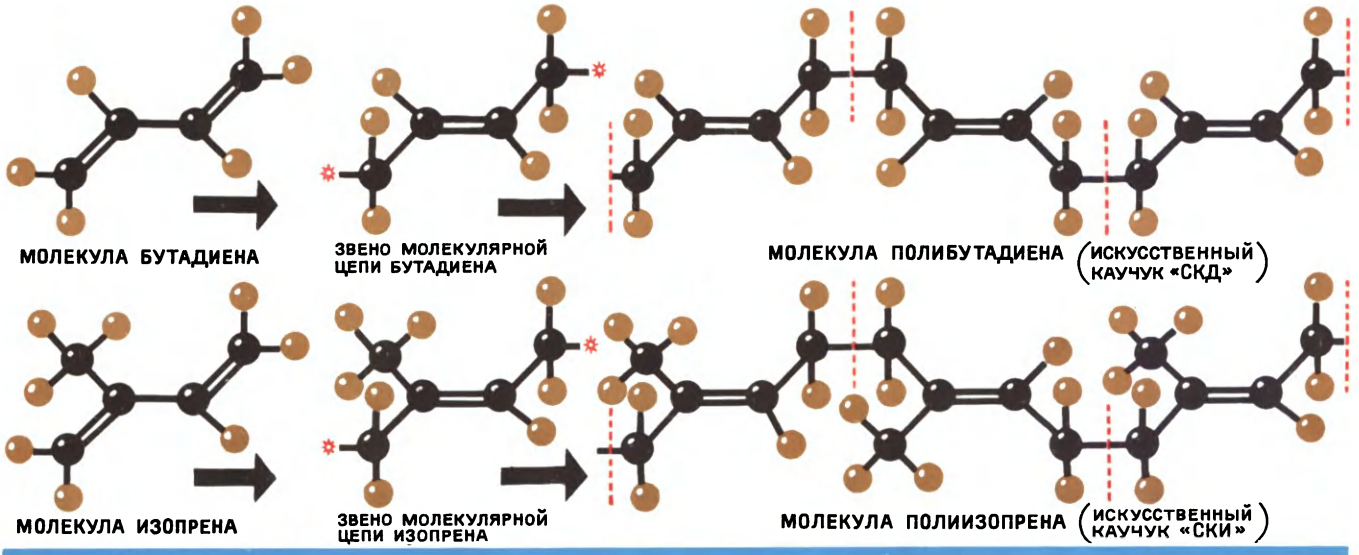
# 1. ПРОЦЕСС ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ



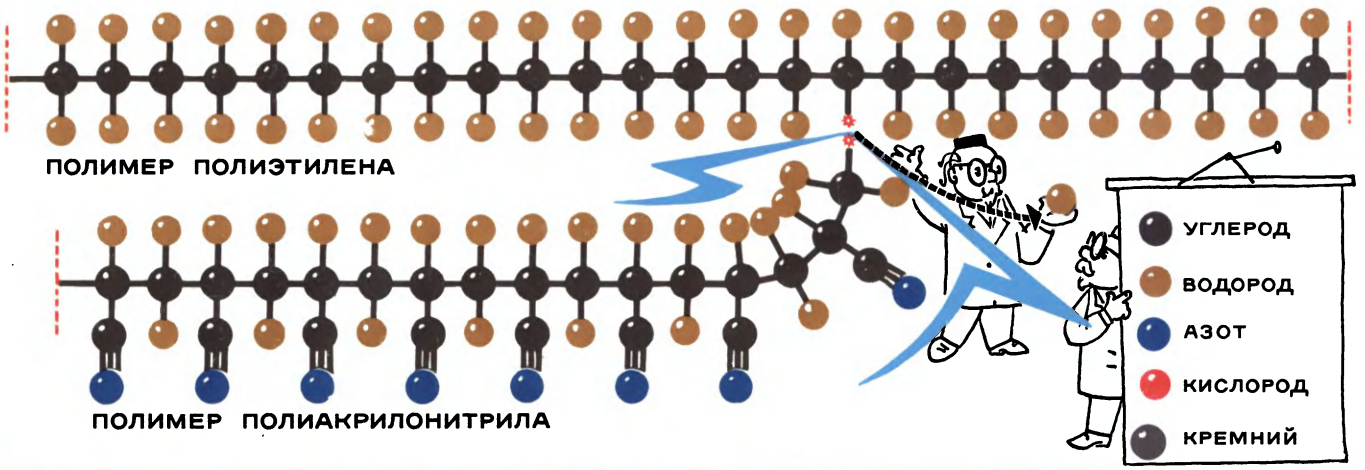

# 2. ПРОЦЕСС ПОЛИМЕРИЗАЦИИ



# 1. КАУЧУКИ

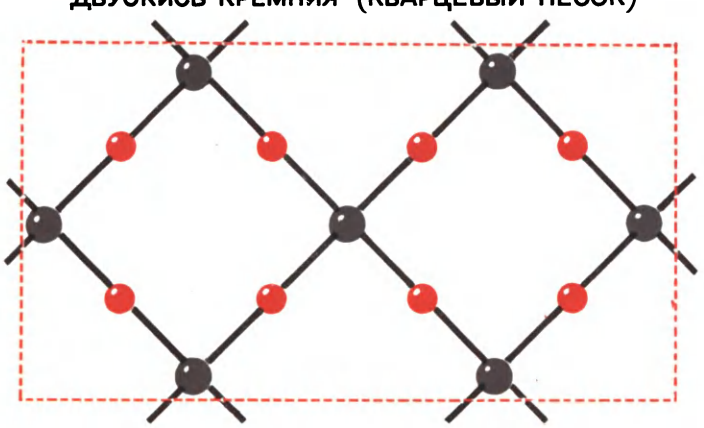



# 2. МЕТОД ПРИВИВКИ ПОЛИМЕРОВ

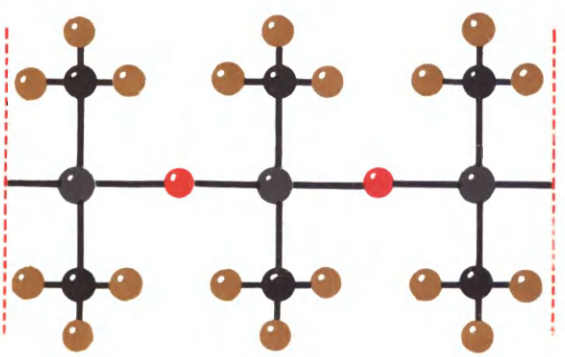



# 3. КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ

ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ (КВАРЦЕВЫЙ ПЕСОК)



СИЛОКСАН



прочны, чем алюминиевая фольга одинаковой с ним толщины. Их широко применяют для изоляции электрических проводов, упаковки пищевых товаров, для изготовления баллонов, в которых хранят газы и жидкости.

## ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ

В процессе полимеризации получаются гигантские молекулы-цепочки из сотен тысяч и даже миллионов составных звеньев. Если в поликонденсации участвуют молекулы и на концах у них заранее заготовлены «крючочки», с помощью которых они соединяются в цепочки полимера, то в процессе полимеризации эти «крючочки» создаются лишь в тот момент, когда каждый мономер становится на свое место в цепочке (рис. 2 — цв. табл. к стр. 480).

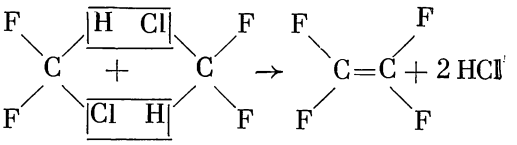
Мы уже говорили, что не все мономеры сразу, без предварительной подготовки, пригодны для создания полимеров. Поэтому чаще всего их приходится предварительно перестраивать и только после этого приступать к «сшиванию» в длинные цепочки.

Чтобы уяснить, как все это происходит в действительности, последовательно рассмотрим процесс создания синтетической пластической массы политетрафторэтилена, или фторопласта (тефлона). Это один из самых сложных процессов. Он наглядно покажет методы и приемы, к каким приходится прибегать современной химии высокомолекулярных соединений (цв. табл. к стр. 488).

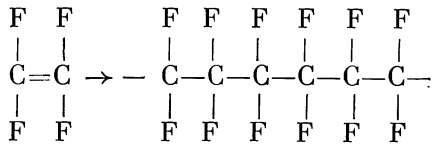
Химики заранее задались целью получить вещество, которое обладало бы сочетанием свойств, не встречающихся в природе. В качестве исходного вещества был взят газ метан. Чтобы конечный продукт был теплостоек, устойчив к самым сильным химическим реактивам и обладал многими другими достоинствами, атомы водорода в нем нужно заменить атомами фтора. Для этого метан подвергают действию хлора. В ходе химической реакции из молекулы метана удаляются три атома водорода и на их место становятся три атома хлора. Вместо молекулы метана образуется молекула хлороформа $CHCl_3$. Один атом водорода еще сохраняется. Хлороформ подвергают воздействию фтористого водорода. Из молекулы хлороформа удаляются два атома хлора, и на их место становятся два атома фтора. Образуется молекула дифторхлорметана $CHF_2Cl$.

Итак, атомы фтора заняли в молекуле метана место атомов водорода. Сейчас уже можно приступить к созданию тетрафторэтилена — исходного мономера, необходимого для постройки цепочки задуманного полимера.

Остается удалить из новой молекулы «вспомогательный» атом хлора и атом водорода, которые тяготеют друг к другу и стремятся соединиться в молекулу HCl. Но это может произойти лишь в ходе взаимодействия двух молекул дифторхлорметана, так как иначе в них остались бы свободные (ненасыщенные) связи у атомов углерода:



Заготовка исходного вещества закончена. Можно приступить к «сшиванию» полученных мономерных молекул в политетрафторэтилен. Процесс полимеризации проводят под высоким давлением в присутствии катализатора, например перекиси водорода.

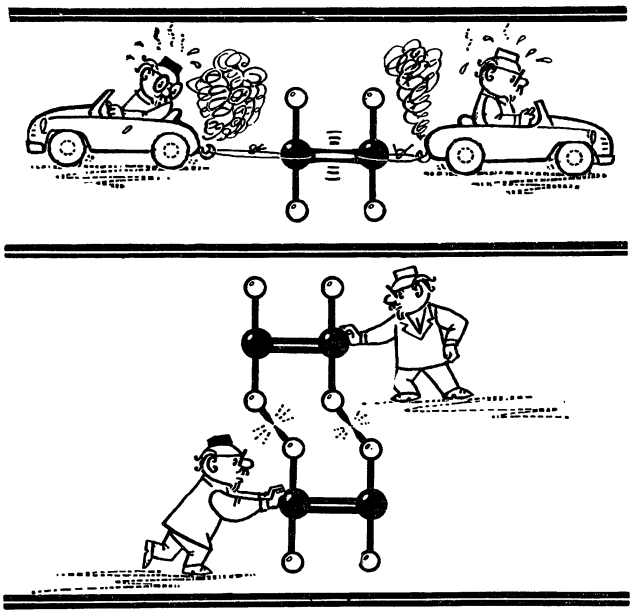


Полученный полимер — белая твердая масса — обладает необыкновенными свойствами и сохраняет их в очень широких температурных пределах, от —60° до +300°.

На фторопласт не действуют ни щелочи, ни кислоты. Его не растворяет даже так называемая «царская водка» (смесь соляной и азотной кислот), разъедающая золото и платину. Поэтому фторопласт, который иногда называют «органической платиной»,— идеальный материал для изготовления химической посуды, труб и аппаратуры. Кроме того, пока это самое скользкое вещество в мире. Брошенная на стол пленка из фторопласта может буквально «стечь» на пол. Если скользящую поверхность лыж подбить такой пленкой, скорость спуска с горы резко увеличивается. Фторопластовые подшипники в некоторых приборах и машинах могут работать бесконечно долго без всякой смазки! Фторопласт — прекрасный диэлектрик, обладающий к тому же исключительно высокой теплостойкостью. Защищенные им электрические провода и обмотки могут выдерживать перегрев до 400° (температура, при которой плавится свинец). Единственный недостаток полимера — трудность и сложность переработки его в изделия — пленки, волокна.

## СЕКРЕТ ПРОЧНОСТИ

Молекулы органических веществ, образовав длинные цепочки из десятков и сотен молекул-мономеров, приобретают необычную прочность. Происходит это из-за исключительной «цепкости» атомов углерода. Возьмем цепочку уже



знакомого нам полиэтилена. Ее метиленовые звенья прочно «сшиты» между собой валентными связями углерода. В свою очередь метиленовые звенья двух соседних молекул тоже притягиваются друг к другу, но довольно слабо. Чтобы разорвать валентную связь между двумя углеродными атомами, нужно затратить примерно в 160 раз больше энергии, чем для того, чтобы переместить относительно друг друга два соседних метиленовых звена. Поэтому оторвать одну от другой обычные малые молекулы, например расплавить вещество, которое они образуют, или просто разъединить их механическим путем куда легче, чем разорвать самое молекулу.

А вот в гигантской молекуле все происходит иначе. Чтобы переместить две такие молекулы друг относительно друга, нужно силу притяжения двух метиленовых звеньев умножить на общее количество таких звеньев во всей цепочке полимера. А их может быть несколько десятков тысяч. В этом случае куда легче разорвать самое молекулу, чем оторвать друг от друга две молекулы полимера.

Выше речь шла главным образом об одной, отдельно взятой гигантской молекуле. Но в любом, даже ничтожно малом, количестве вещества их превеликое множество, и от того, как они располагаются друг относительно друга, зависят и свойства вещества. Цепочки могут располагаться прямолинейными параллельными пучками, вроде проводов в телефонном кабеле. Тогда вещество приобретает свойство прочных эластичных волокон или очень гибкого твердого тела. Если же молекулы свернуты в клубки, вещество приобретает способность сильно растягиваться и вновь сокращаться, вроде всем хорошо знакомых изделий из каучука.

В зависимости от этого в них проявляются самые необычные и неожиданные сочетания физических свойств. Они могут одновременно счастливо сочетать в себе упругость, свойственную газообразным веществам, текучесть и несжимаемость, присущие жидкостям, сопротивляемость любому изменению формы, характерную для твердых тел.

Например, некоторые полимеры способны течь, как и жидкости, и одновременно обладают огромной вязкостью, в миллионы раз большей, чем очень вязкие вещества, например масла. При медленном механическом воздействии на них такие полимеры весьма податливы, легко деформируются и как бы текут. При более быстром воздействии они сопротивляются, как самая упругая резина, а при ударе ведут себя, как твердое тело.

## СТЕКЛО, КОЖА ИЛИ РЕЗИНА?

Все полимеры можно разделить на две большие группы: полимеры, имеющие аморфную структуру, такую, как, например, стекло, и полимеры с частично кристаллической структурой.

В аморфных полимерах молекулярные цепочки переплетены друг с другом в самых причудливых комбинациях. Такие полимеры используют для получения различных веществ — от искусственной кожи и резины до органического стекла. Иначе говоря, они могут обладать свойствами и стекла, и резины, и кожи. Однако эти их свойства существуют только при обычной, комнатной температуре. Резина, если ее заморозить до температуры —80°, разлетается при ударе, как стекло. Если же стекловидную пластмассу начать нагревать, то она становится сначала мягкой и гибкой, как кожа, затем приобретает свойства резины, а при даль-

нейшем нагревании окончательно теряет свою форму и превращается в тягучую вязкую жидкость.

Нужно заметить, что при нагревании полимеры никогда не переходят в парообразное состояние, как вода или другие жидкости. Этому препятствуют большая длина их молекул и сильное притяжение молекул друг к другу в расплавленной массе. Однако жидкий полимер — это не обычная жидкость. Его текучесть определяется не способностью каждой отдельной молекулы скользить вдоль другой, как у обычных жидкостей, а способностью всей совокупности отдельных звеньев длинных молекулярных цепочек скользить вдоль других. Следовательно, вязкость полимера зависит главным образом от длины его молекул.

Многие полимерные вещества в таком состоянии легко превратить в любое готовое изделие путем прессования. При выдавливании их через тончайшие отверстия получаются длинные нити, из которых затем изготовляют волокно и ткут ткани. Так ведут себя высокомолекулярные вещества с линейными или линейно-разветвленными молекулами — термопластические полимеры, т. е. такие, которые можно повторно размягчить и формовать в нужные изделия.

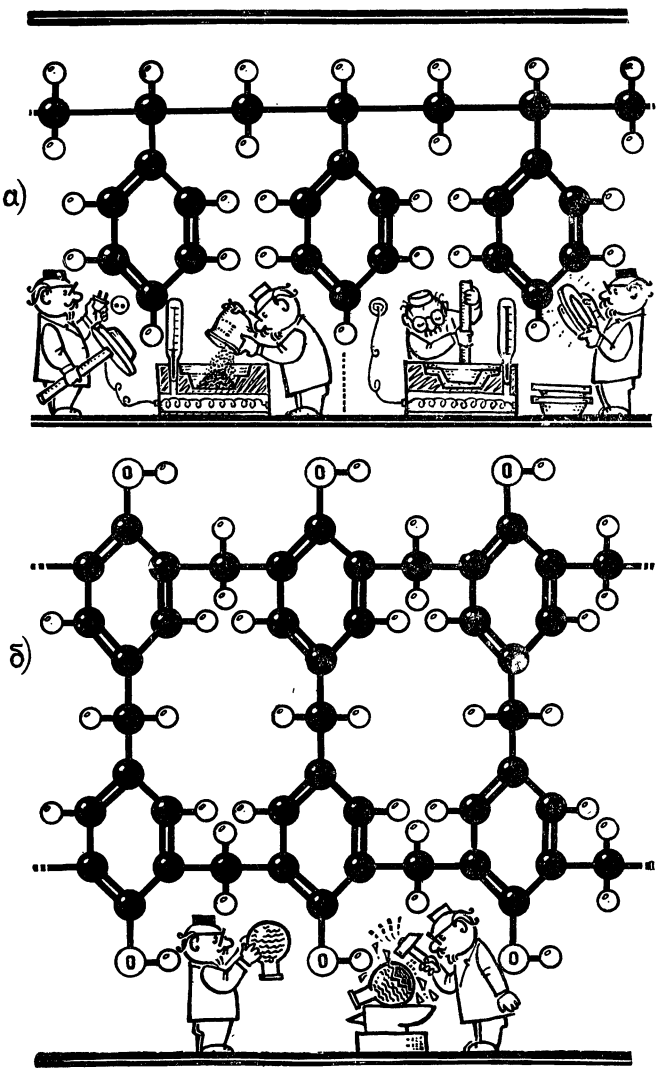
Иначе ведут себя термореактивные полимеры. При их нагревании между соседними молекулами образуются многочисленные связки, препятствующие взаимному скольжению цепочек полимера, и он необратимо твердеет.

Еще более частое расположение таких связок позволяет полимеру сохранять стекловидное состояние до температуры, при которой вместо размягчения сразу начинается его разложение. Так ведет себя при нагревании, например, бакелит.

Ко второй группе относятся полимеры, структура которых частично напоминает структуру кристаллических тел. Эти свойства приходятся на те участки полимера, где все короткие отрезки большого числа длинных молекул улеглись параллельно друг другу. Такие островки порядка в море беспорядка можно обнаружить при помощи рентгеновских лучей. Расположенные между ними звенья образуют аморфные участки полимера. Они служат как бы своеобразным клеем, скрепляющим мелкие кристаллики вещества полимера в твердое тело.

Свойства частично кристаллических полимеров изучены еще сравнительно мало. Установлено, что при повышении температуры они не приобретают свойств резины или кожи, утрачивая только хрупкость, но не твердость. Закристаллизовавшиеся участки не дают изделию изменить приданную ему форму. Твердость таких полимеров зависит от количества кристаллических участков. Однако аморфные участки придают веществу достаточную упругость, что особенно полезно в тех случаях, когда изделие подвергается ударным нагрузкам.

Некоторые природные полимеры (шерсть, шелк, хлопок) потому и обладают высокой прочностью, что их молекулы определенным




**Будет ли полимерное вещество обладать способностью повторно размягчаться и формоваться в новые изделия или же необратимо твердеть, зависит от взаимного расположения полимерных цепочек. При линейно-разветвленном расположении мономеров получаются так называемые термопластические полимеры (*а*); при поперечных связях с соседними цепочками — термореактивные полимеры (*б*).**

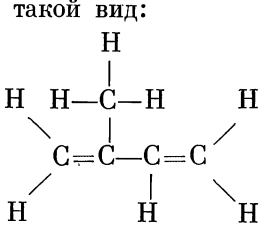
образом ориентированы в пространстве. Когда такую ориентацию удается осуществить в синтетических волокнах, их прочность приближается даже к прочности стали.

## У ИСТОКОВ ВЕКА ПОЛИМЕРОВ

Изменяя состав исходных мономеров, порядок их чередования в гигантских молекулах, условия синтеза и последующей обработки полученных материалов, можно практически неограниченно изменять свойства полимера: от легко воспламеняющихся до совершенно негорючих и жаростойких; от растворимых в воде до отталкивающих влагу; от хрупких и тяжелых, как металл, до эластичных и гибких, как каучук, или в десятки раз более легких, чем вода.

В этой сложной области органической химии ученым предстоит решить еще очень и очень много загадок. Сейчас в распоряжении химиков более 40 видов исходных органических мономеров. Может показаться, что это не так уж много — 40 видов. Но из этих «кирпичиков» получают бесконечное количество синтетических веществ — волокон, смол и пластических масс. Каждый день приносит нам все новые и новые открытия, новые материалы.

Вот, например, каучук. Известен лишь один вид природного каучука — изопреновый. Его молекула имеет такой вид:



Цепочка полимера природного каучука образована примерно из 15 000 молекул изопрена.

Как образуются углеводородные цепи природного каучука, ученые пока еще не знают, но химики стремились создать синтетический каучук со структурой, близкой к природному. Именно такой каучук, марки «СКИ», создан советскими учеными.

У резины, изготовленной из натурального каучука, целый ряд недостатков. Она разбухает в бензине, боится масла, разрушается при нагревании выше 120°. Но химики создали много сортов искусственных каучуков, устойчивых к действию бензина и масла, глубокого холода и температур выше 100°, например полибутадиеновый «СКД» (рис. 1 — цв. табл. к стр. 481). Недавно полученный полиуретановый каучук химически совершенно не похож на естественный. Он настолько износоустойчив, что изготовленные из него шины, по-видимому, смогут пережить автомобиль.

Из стеклянного волокна или ткани, связанной эпоксидными смолами, прессуются корпуса автомобилей, лодок, кораблей, детали изделий и шахтного оборудования и даже... спиральные пружины, которые по своей прочности, выносливости и упругости превосходят стальные.

Существуют полимерные клеи, способные склеивать все, что угодно, например резец с державкой. При перегрузке чаще лопается резец или державка, чем место склейки. Поверхность склейки, равная всего 20 $см^2$, способна уже через полчаса выдержать вес легкового автомобиля с тремя пассажирами. Подобные клеи применяются для «шитья» одежды, склейки корпуса и крыльев самолета и даже для строительства металлических клееных мостов!

Из смеси некоторых полимерных клеев, изготовленных на базе фурфурола и песка, получается отличный легкий, быстротвердеющий,

### Новоселы семьи полимеров

**Полиорганометаллосилоксаны... Какое мудреное название! Впрочем, для химии это не редкость. Если же говорить о качествах этих новых полимеров, то они обещают многое. Вы уже знакомы с кремнийорганическими полимерами. Они стоят на грани двух химических миров — органического и неорганического. В молекулах этих полимеров вместе с углеродом присутствуют также атомы кремния и кислорода. Это придает полимеру очень важное свойство — жаростойкость. Кремнийорганические лаки, например, выдерживают температуру 300—400°.**

**А что, если в неорганическую часть молекулы ввести, помимо кремния, и другие элементы: алюминий, титан, бор? Очень заманчиво!**

**И вот уже созданы новые полимеры — их-то и называют полиорганометаллосилоксанами. В молекулярной цепочке таких полимеров находятся звенья: кремний — кислород — алюминий, кремний — кислород — титан, кремний — кислород — бор и др. Идя по этому пути, наши химики создали так называемые циклолинейные полимеры с очень интересными свойствами. Они не плавятся до температуры 500—600°!**

влагостойкий бетон, прочный и на сжатие и на растяжение, не нуждающийся в армировании сталью. Он не боится огня, кислот, щелочей, морской воды, времени, не нуждается в окраске.

Так же необычен и «твердый» бензин. Он заключен в блоки из миниатюрных пластмассовых сот с очень тонкими стенками. Его можно перевозить и хранить открытым, он не испарится и не вспыхнет. Перед употреблением бензин из полимерного блока выжимают, как воду из губки, небольшим ручным прессом.

Но и это еще не все. Зная законы образования полимеров, можно изменять свойства высокомолекулярных соединений совсем уже необычными способами. Допустим, в полимер, не обладающий высокой температурной стойкостью, удалось ввести еще один теплостойкий мономер, который нарушил первоначальную однообразную структуру цепочки. В результате получился так называемый с о п о л и м е р, т. е. как бы двойной полимер, обладающий уже высокой теплостойкостью. Чередуя определенные количества мономеров одного вида с тем или иным числом мономеров другого вида, можно получить сополимеры с самыми различными, порой даже неожиданными свойствами, например: с очень большой сопротивляемостью различным растворителям, высокой прочностью, гибкостью, растяжимостью, долговечностью.

Для создания полимеров применяют и методы п р и в и в к и примерно так, как это делается в садоводстве (рис. 2 — цв. табл. к стр. 481). К какому-либо мономеру, входящему в качестве звена в цепочку основного полимера, сбоку присоединяется мономер, являющийся начальным звеном цепочки другого полимера. Для такой операции из молекулы-мономера тем или иным способом удаляют какой-либо из атомов, обычно атом водорода, а на освободившиеся места наращивают боковые цепочки. Прямолинейная гигантская молекула начинает ветвиться, как дерево. Но ветви эти имеют особый, отличный от нее состав, и весь полученный таким путем полимер приобретает совершенно новые свойства.

Так можно, например, «привить» ветку полистирола к цепочке молекул целлюлозы. Последняя жадно впитывает воду, а полистирол отталкивает ее. В результате материалы, изготовленные из такой «привитой» целлюлозы, приобретают способность отталкивать воду. Это весьма важно для тканей, идущих на изготовление палаток, плащей, складных лодок и т. д. Сколько огорчений и неприятностей вызывает вид помятой одежды, плохо выглаженного белья, сколько полезного времени отнимает их утюжка! «Прививая» молекулы акрилонитрила к молекулам целлюлозы, можно получать волокна для немнущихся тканей.

Некоторые полимеры обладают ценными свойствами полупроводников (см. ст. «Полупроводники»). Такие вещества очень нужны для современной радиоэлектроники, приборостроения, космической навигации.

## И В ОГНЕ НЕ ГОРИТ...

Действие некоторых фантастических романов развертывается на планетах, где температура достигает нескольких сот градусов, где текут реки из расплавленного камня, а населяющие эти планеты живые существа выдерживают подобную жару.

Так могло, пожалуй, быть, если бы в составе живой материи — молекул органического вещества— место атомов углерода заняли атомы кремния. Все, что в природе связано с этим элементом, например кварц, песок, отличается высокой теплостойкостью.

Конечно, создать живую материю на основе кремния еще никому не удавалось. Но ввести в некоторые органические полимеры атомы кремния ученым удалось еще лет 30 назад. Тогда впервые были получены полимеры-гибриды из углеводородных и кислородных соединений кремния, т. е. органических и неорганических веществ, что впоследствии привело к идее создать действительно ни на что не похожие полимеры.

Современная промышленность нуждается в электрических двигателях, которые развивали бы большую мощность при очень небольших размерах. Этого можно достигнуть, увеличив сверх нормы силу электрического тока, пропускаемого через обмотки двигателей, что неизбежно ведет к их резкому перегреву. Поэтому потребовалось разработать совершенно новые изоляционные материалы, способные выдерживать очень высокую температуру.

Получить такие материалы долго не удавалось. Вместо них химики получили содержащие кремний жидкости. Для них тоже нашлось применение: они оказались отличными смазочными маслами, которые выдерживали очень высокую температуру. Примерно к 1945 г. были получены первые содержащие кремний каучуки, а затем и смолы.

В молекулах органических веществ атомы углерода соединяются валентными связями не-

посредственно друг с другом. В кремнийорганических соединениях атомы кремния соединены между собой через атомы кислорода. Поэтому их и назвали силоксанами (от латинских слов «силициум» — кремний и «оксигениум» — кислород) (рис. 3 — цв. табл. к стр. 481).

Силоксаны, как и органические мономеры, способны соединяться в длинные цепочки. При этом в зависимости от исходного состава участвующих в этом мономеров, а также по мере удлинения молекулы сначала получаются жидкие полимеры, затем вязкие смолы, потом каучуки и, наконец, твердые вещества. Если цепочки кремнийорганических полимеров связаны между собой еще и перемычками, они образуют структуру, отличающуюся особой прочностью.

Получать кремнийорганические полимеры можно несколькими путями, в том числе и обычными для органических полимеров, т. е. поликонденсацией и полимеризацией. И хотя эта отрасль химии высокомолекулярных соединений зародилась относительно недавно, ее вклад в науку и технику уже сейчас весьма велик и продолжает расти с каждым днем.

Возьмем для примера кремнийорганические смолы. На их основе удалось создать краски, которые отлично предохраняют бетонные и каменные сооружения от действия влаги и разрушения. Силоксановыми и силиконовыми красками и лаками окрашивают нагреваемые до высоких температур печи, трубопроводы, которые раньше вообще не окрашивались, так как любые краски на них разлагались или выгорали.

Силиконовыми смолами пропитывают ткани из стеклянного волокна. Эти ткани используют для изоляции деталей электрических машин. Электрический двигатель с кремнийорганической изоляцией обмотки работает даже будучи погруженным в воду.

Особенно удивительные качества приобретают получаемые на основе кремнийорганических полимеров каучуки. Никакая автомобильная покрышка, изготовленная из естественного или синтетического каучука, не может выдержать в рабочих условиях изменения температуры от —60° до +130°. А некоторые сорта силиконовой резины выдерживают нагрев даже до 350°!

Кремнийорганический каучук очень теплостоек, но плохо переносит действие бензина и масла. Однако если в изготовленные из него пленки ввести соответствующий органический мономер (например, акрилонитрил) и воздействовать на них сильным гамма-излучением, то к кремнийорганическому полимеру «привьются» боковые веточки полиакрилонитрила. Получится каучук и теплостойкий, и устойчивый против действия бензина и масел.

Многие приборы (вентили, части насосов и т. д.), через которые проходят горячие и едкие жидкости, нуждаются в смазке. Никакие масла, жиры, тавоты для этого непригодны. А водоотталкивающая, теплостойкая, прочно удерживающаяся на рабочей поверхности кремнийорганическая эмульсия прекрасно справляется с этой задачей.

Кремнийорганическая смазка, нанесенная тонким слоем на окна самолета или автомобиля, длительное время предохраняет стекло от смачивания водой, запотевания, обледенения. Если вылить воду из посуды, покрытой тонким слоем кремнийорганической смазки, на стенках не останется ни капли жидкости. Это очень важно для некоторых химических производств и лабораторных экспериментов.

Очень ценны кремнийорганические соединения в тех случаях, когда нужно предотвратить прилипание одного вещества к другому независимо от того, будут эти вещества в холодном, теплом или горячем состоянии. В литейном производстве долгое время был большой производственный брак оттого, что формовочная смесь прилипала к стенкам моделей, а расплавленный металл—к изложницам. Когда модели стали покрывать силиконовыми смазками, брак был устранен. Применяются эти смазки и в производстве резиновых изделий: смазкой покрывают внутреннюю поверхность труб и аппаратуры, по которым проходят липкие жидкости.

В некоторых производствах образование пены — серьезный, даже опасный недостаток. Образуется она от незначительной примеси белков, моющих веществ и других так называемых поверхностно-активных веществ, концентрирующихся в виде тончайших пленок на границе между воздухом и жидкостью. Если кипящую жидкость перемешивать, количество пены резко увеличивается.

Существует много способов уничтожения пены: механические (вращающиеся диски, центрифуги), химические (добавления касторового масла). Однако все они дороги, недостаточно эффективны, а главное, больше препятствуют образованию новой пены, чем уничтожают старую. И лишь кремнийорганические вещества радикально устраняют эту неприятность, причем требуемое для этого количество примеси весьма невелико: от одной до 25 частей на миллион!

Ученых заинтересовала и такая проблема: если органическое полимерное вещество можно сшить с неорганическим полимером, содержащим кремний, то почему бы не попытаться сделать это и с металлами?

Попытка принесла блестящий успех. Полистирол, «привитый» к металлическому порошку, дал сополимер, по свойствам похожий и на металл и на пластик. Из него можно штамповать любые изделия, обычно изготовляемые из металла.

Появились полимеры, в молекулы которых входят атомы кремния, кислорода и металлов — алюминия, бора, кобальта. Такие металлоорганические полимеры особенно интересны тем, что обещают поднять «потолок» устойчивости к высоким температурам. Многие современные отрасли техники уже перестали удовлетворяться даже чудесными свойствами кремнийорганических полимеров, выдерживающих температуру в 350—450°. Нужны материалы, которые могли бы длительное время работать при температурах 600—1000° и выше! А ведь с каждым годом эти требования будут все повышаться.

Таковы лишь немногие области применения кремнийорганических полимеров. Но и их достаточно, чтобы представить себе увлекательные перспективы, открывающиеся здесь перед наукой и техникой ближайшего будущего.

Сейчас химия высокомолекулярных соединений способна получать материалы с заранее заданными свойствами — «выкроенные» и «сшитые» по заказу. Но достижения сегодняшней химии полимеров — лишь первые ее шаги.

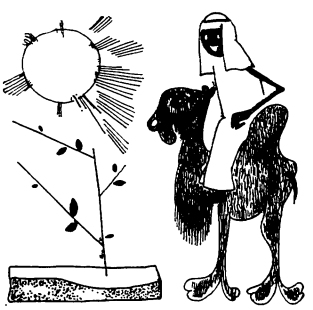
Именно в этой области человек сможет в полной мере развернуть свои силы и возможности для создания «второй природы» — веществ, каких еще не было и нет. Человеку рано или поздно удастся приблизиться к тому удивительному совершенству, с каким живой организм строит свои гигантские молекулы.

■

### Сады в пластмассе

**В пустыне нельзя вырастить сад. Там много тепла и света, есть и вода, но она скрыта глубоко под слоем песка. В сухом, бесплодном песке нет питательных солей и не удерживается влага. Растения жить не могут.**

**В одной из пустынь Кувейта на Аравийском полуострове недавно удалось вырастить сад в необыкновенной почве: ямы в песке, приготовленные для посадки деревьев, были за-**



**полнены пенистой пластмассой. Новый вид искусственной почвы обладает способностью удерживать воду и минеральные соли, необходимые для питания растений. Все саженцы принялись. Быть может, такая искусственная почва из пластмассы поможет в будущем вырастить зеленые цветущие сады в безжизненных, мертвых пустынях, а их на нашей Земле немало — почти 20 млн. *км²*.**

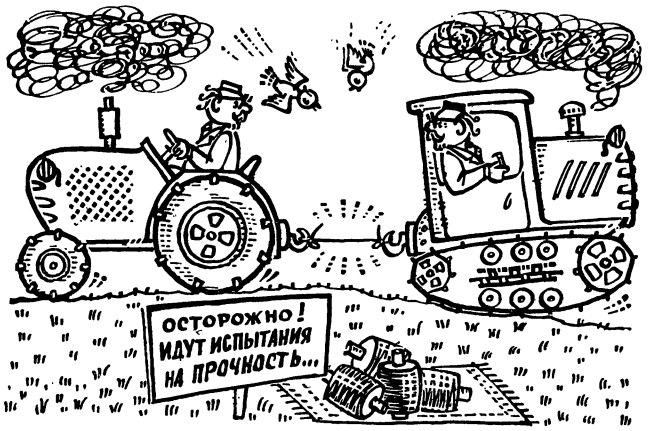
## ПОЛИМЕРЫ БУДУЩЕГО

Химия полимеров — новая область науки. Она быстро развивается и в будущем даст много открытий, приведет к созданию неизвестных сейчас материалов. Некоторые из них будут совершенно неожиданными, появление других можно предсказать уже сейчас. Полимеры будущего должны обладать многими замечательными качествами, но особенно важны полимеры с высокими механическими свойствами.

### ПОЛИМЕРЫ — СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Авторы научно-фантастических романов рисуют нам конструкционные материалы будущего, в которых сочетаются лучшие свойства известных материалов — прочность стали, прозрачность стекла и в то же время упругость и стойкость к ударам, присущие лучшим пластикам. Возможно ли создать такие материалы, и какие пути ведут к этому?

Из трех перечисленных материалов наиболее прочны силикаты (стекло), но они хрупки; металлы тяжелы и непрозрачны; пластики упруги, но недостаточно прочны. Уже давно предпринимаются попытки сочетать в одном материале лучшие свойства двух веществ — стекла и пластика. Для этого стекло вытягивают в тонкие нити, из нитей готовят ткани или подобие войлока и пропитывают жидким веществом, способным со временем или при нагревании превращаться в упругий полимер. Таким образом, прочность создается стеклянными нитями, а упругость — пропиты-




**Уже сейчас возможно получать полимерные нити с прочностью хорошей стали.**

вающим полимером. Эти замечательные материалы называются стеклопластиками и широко применяются в авиации, судостроении, для изготовления труб, мебели. В будущем прочность стеклопластиков увеличится еще больше благодаря повышению прочности стеклянных нитей.

Но еще более интересный путь — замена стеклянных нитей нитями из синтетических полимеров. Уже сейчас можно получать полимерные нити с прочностью до 150—170 *кг/мм*$^2$, т. е. с прочностью хорошей стали. Плотность таких нитей в 7—8 раз меньше, чем у стали, и, таким образом, на единицу веса они во много раз прочнее металла. В недалеком будущем удастся получить еще более прочные искусственные волокна. Применяя их вместо стеклянных волокон, химики создадут новые материалы легче и прочнее стали.

Вся эта группа материалов, состоящих из различных волокон и полимера-связующего, называется армированными пластиками. Пока они с трудом перерабатываются в изделия, но, когда освоят их обработку на машинах, армированные пластики станут важнейшим конструкционным материалом.

**Есть полимерные материалы, которые отличаются необычайно высоким сопротивлением к истиранию и износу. Шины, сделанные из них, проходят сотни тысяч километров.**

Существует возможность получить подобные материалы, не вводя в полимер стеклянные или другие волокна. Некоторые полимеры, кристаллизуясь, образуют длинные и тонкие кристаллы, очень похожие на волокна. Такие кристаллики могут играть ту же роль, что и волокна в армированных пластиках. Полимеры, кристаллизующиеся таким образом, тоже замечательно сочетают в себе прочность и упругость. Примером такого самоармирующегося полимера являются поликарбонаты. Они пока дороги и применяются только в специальных случаях, но им принадлежит большое будущее.

Уже сейчас есть полимерные материалы, которые отличаются необычайно высоким сопротивлением к истиранию и износу. Шины, сделанные из них, проходят сотни тысяч километров. Основой для этих полимерных материалов служат пока еще дорогие и редкие полиуретанэфиры. Но, несомненно, разработают более простую технологию, и неизнашивающиеся полимеры прочно войдут в производство шин, покрытий полов, шлангов и любых трущихся изделий из резины. Удивительная способность этих полимеров сопротивляться износу вызвана тем, что в них не распространяются трещины; каждая маленькая трещина, являющаяся началом разрушения вещества, быстро залечивается. В любом месте повреждения эти полимеры быстро упрочняются, что препятствует дальнейшему распространению повреждения.

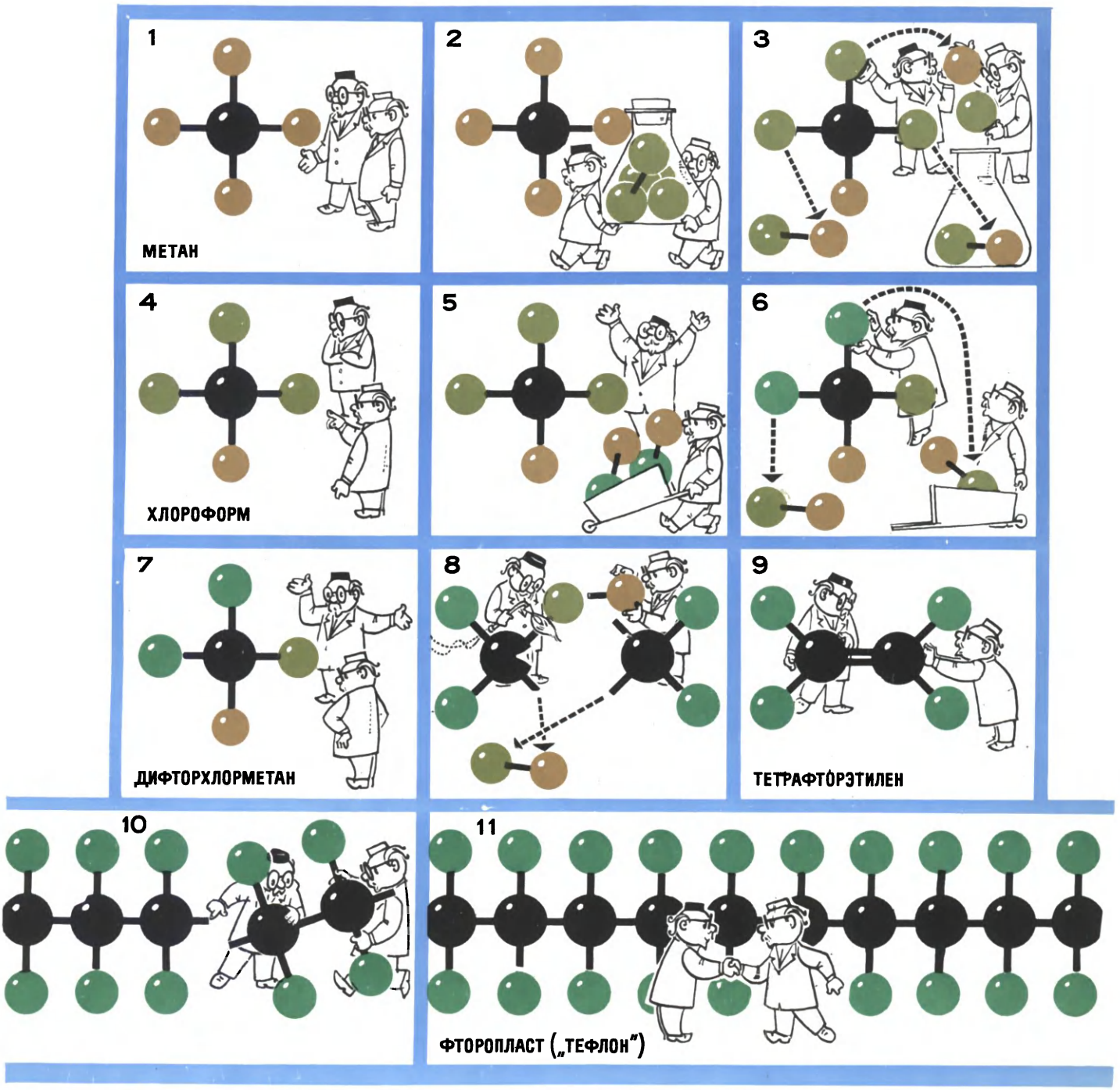
С помощью таких полимеров химики получат еще один класс полимерных материалов — прочные и очень легкие полимерные пены. Обычные полимерные пены применяются довольно широко и сейчас; они обладают легкостью и малой теплопроводностью. Но они непрочны и легко истираются. Если же приготовить пены из неистираемого полимерного вещества, то сфера их применения значительно расширится. Уже сейчас пены из полиуретанэфиров начинают широко использоваться в технике, для матрасов и мебели, для подкладки легкой и теплой одежды.

Однако прочность полимерных пен остается все же небольшой, и возникает желание их упрочнить. Мы знаем, что для упрочнения полимеров в них вводят волокна. Нельзя ли армировать и пены? Жесткими волокнами (стеклянными или даже обычными синтетическими) армировать пены нельзя: слишком велико различие их свойств. Пена будет легко растягиваться, а жесткие волокна растягиваться так не смогут и начнут от нее отрываться. Материал легко разрушится. Но если армировать пену упругими и прочными волокнами, которые растягивались бы так же, как и она сама, это затруднение исчезнет. Таким способом можно создать прочные, очень легкие и стойкие к износу пенные полимерные материалы.

## ПОЛИМЕРЫ В ЖИЗНИ ЛЮДЕЙ

В будущем появится много новых полимерных материалов — легких, прочных, эластичных. Как же будут выглядеть одежда, обувь, жилища, предметы обихода, транспорт?

Мы привыкли одеваться в ткани и обычно уже не думаем, насколько сложно их изготовление. Сначала нужно получить волокна, из волокон сделать нити, пряжу, из нитей соткать ткань. Каждый процесс состоит из десятков отдельных операций, через многие




# ПОЛУЧЕНИЕ ФТОРОПЛАСТА

десятки машин пройдет каждое волоконце от коробочки хлопчатника до готовой ткани (см. т. 5 ДЭ, ст. «От волокна до ткани»).

Конечно, в будущем люди научатся получать материалы для одежды более простыми путями, и некоторые из этих путей уже наметились. Прежде всего, можно использовать тонкие слои полимерных пен. Они исключительно легки и хороши для теплой одежды. Сейчас пены еще недостаточно прочны и их применяют для утепления одежды в качестве подкладки. Когда удастся повысить их прочность, они станут самостоятельным материалом для одежды.

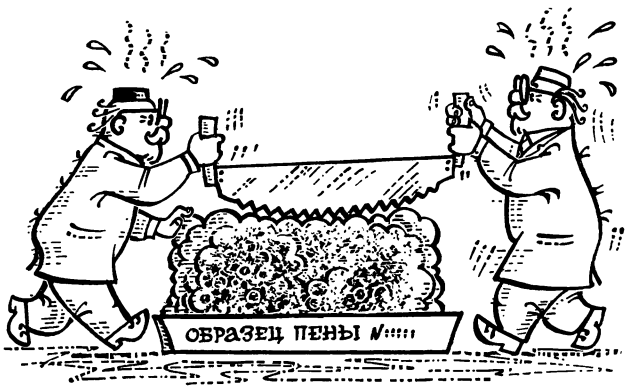
Необходимо, чтобы любой материал для одежды был пористым и мог пропускать воздух и пары влаги. Поэтому обычные сплошные пленки, вероятно, никогда не будут служить материалом для одежды, за исключением плащей и специальных защитных костюмов для работы с вредными веществами. Чтобы пленка «дышала», в ней надо проделать большое количество очень маленьких дырочек. От этого, конечно, уменьшится общая прочность пленки, однако если исходная прочность очень велика, то и оставшейся части будет достаточно для использования пленки в качестве основной ткани. А разнообразные полимерные пленки становятся все более и более прочными. В будущем прочность их станет достаточной и для изготовления своеобразной нетканой одежды из пленок с большим числом маленьких отверстий.

В основном же нетканые материалы для одежды будут получать и уже получают из беспорядочно перепутанных волокон, создавая нечто среднее между войлоком или фетром и бумагой. Чтобы эти ткани были и тонкими и одновременно достаточно прочными, их будут делать из очень прочных волокон. Кроме того, чтобы ткань не мялась, как бумага, волоконца должны быть еще и упруги и склеены друг с другом. Склеивающее вещество не должно образовывать сплошную пленку, иначе потеряется пористость, способность пропускать воздух и влагу. Значит, склейка должна быть точечной только в тех местах, где волоконца соприкасаются друг с другом. Это очень нелегкая задача, но она будет решена. Привычные нам ткани постепенно исчезнут и будут заменены различными неткаными изделиями.

Изменятся не только сами материалы для одежды. Изменятся и волокна, из которых делают ткани. Появятся очень прочные волокна. На первый взгляд может показаться, что прочность не так уж нужна одежде — ведь никто не будет носить одну и ту же вещь десятки лет. Она надоест, выйдет из моды, устареет прежде, чем износится. Но очень прочные волокна нужны и для нетканых изделий, и для смешения с другими волокнами, которые менее прочны, но обладают другими ценными свойствами.

Наиболее интересна комбинация из очень прочных и пористых волокон. Пористые волокна можно получить из полимерных пен. Они исключительно легки и хороши для теплой одежды, но не прочны и не могут применяться в чистом виде. В смеси же получатся замечательные легкие и теплые материалы, у которых несомненно большое будущее.

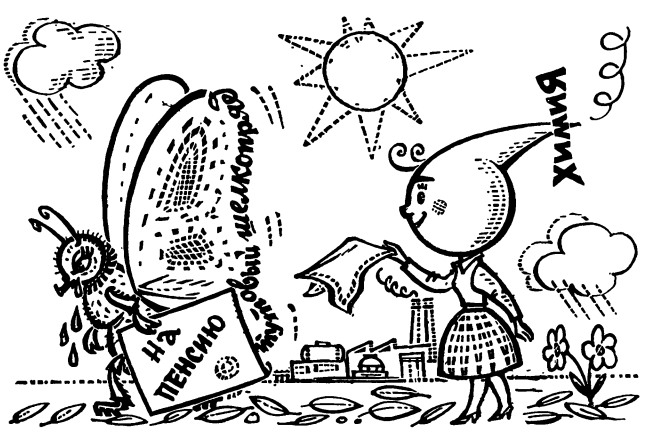
Синтетические волокна так быстро совершенствуются, что возникает вопрос: сохранятся ли в будущем




**Из пленки, армированной упругими и прочными волокнами, можно создать очень легкие и стойкие к износу пенные полимерные материалы.**

естественные волокна, какие, в каком количестве и в каком виде? Некоторые из природных волокон исчезнут, и очень быстро. В первую очередь естественный шелк. На его получение затрачивается громадный труд — в десятки раз больший, чем на производство искусственных волокон. Современные синтетические волокна уже превосходят природный шелк большинством своих свойств. Такая же судьба ожидает и лен. Искусственные волокна из целлюлозы уже сейчас очень близки к хорошему льняному волокну, а в будущем превзойдут его. Лен сохранится не из-за волокна, а из-за льняного масла, получаемого из его семян. Это масло перерабатывают в лучшую олифу для красок. Пока будут выращивать лен, сохранится и льняное волокно. Когда же найдут синтетические вещества для лакокрасочных покрытий, льняное волокно исчезнет окончательно.

Шерсть сохранит свое значение еще долгое время. У шерстяного волокна есть замечательное свойство — мелкая извитость, которая придает изделиям из него высокие теплоизолирующие свойства. Лишь совсем недавно удалось выяснить причину такой извитости. Оказалось, что каждое волокно шерсти состоит из мно-




**Некоторые из природных волокон исчезнут, и очень быстро. В первую очередь натуральный шелк.**

*К статье «Полимеры будущего»*

**Со временем создадут долговечные полимерные пленки, и тогда множество легких жилищ даже на далеком севере будут делать из пленок.**

жества более мелких волоконец двух разных типов, склеенных друг с другом. Одни из них имеют круглое сечение, другие почти плоское. Неравномерное распределение этих волоконец по сечению волокна и создает такую мелкую извитость. Когда причина извитости стала ясна, появилась и возможность создать синтетические волокна такого же строения, а следовательно, с такими же свойствами. Но шерсть отличается еще и строением поверхности волокон, покрытых мельчайшими чешуйками, подобно змеиной коже. Именно эта особенность строения поверхности волокон шерсти обусловливает их способность сцепляться друг с другом, а это позволяет шерстяным изделиям хорошо сопротивляться истиранию. Вероятно, в будущем создадут синтетические волокна с такими свойствами. Но это дело очень далекого будущего. Шерсть послужит нам еще многие десятилетия.

Сохранится надолго и хлопок. Но применять будут только химически обработанные волокна. Уже сейчас поверхность хлопковых волокон покрывают очень тонким слоем синтетических полимеров. И хотя количество нанесенного вещества составляет лишь несколько процентов от веса хлопка, хлопковые волокна после такой обработки приобретают ряд ценных свойств, присущих обычно синтетическим волокнам: способность хорошо окрашиваться, не мяться и сохранять свою форму после стирки. Несомненно, в будущем удастся повысить их прочность и стойкость к износу, а может быть, создать и извитость, как у шерсти. Таким образом, хлопок останется, но в измененном, улучшенном виде. Его будут химически модифицировать.

На века сохранится и дерево — великолепный материал нашего времени. Но и его будут применять только в модифицированном виде. Древесину станут пропитывать мономерами — легкоподвижными жидкостями, проникающими в мельчайшие поры древесины и впоследствии превращающимися в полимеры. Это даст возможность сочетать прекрасные природные качества дерева с превосходными качествами пластиков. Дерево станет негниющим, не будет набухать в воде и трескаться при высушивании, станет прочнее и красивее.

Несомненно, в недалеком будущем создадут пластичную древесину, которая сможет приобретать нужную форму под прессом, как приобретают ее типичные пластики. Мебель, двери, оконные рамы начнут прессовать из такого модифицированного дерева. Химическая обработка поможет использовать малоценные, но быстрорастущие сорта деревьев.

...И одежду, наверное, будут не шить, а склеивать.

Вероятно, гораздо шире, чем сейчас, будут использовать синтетический клей. Действительно, склеивание — это самый удобный способ соединять части любой конструкции, будь то мебель, машина или одежда. И сейчас есть очень прочные клеи, иногда они прочнее тех материалов, которые соединяют. Но дело не только в прочности клея или в его способности соединяться с материалами. Важно, что в тонком слое клея, отличающемся по своим механическим свойствам от склеиваемых материалов, как бы концентрируются те напряжения, те механические усилия, которые испытывает склеенное изделие. Часто поэтому слои клея разрушаются в первую очередь. В будущем удастся создать такие приемы склеивания, когда один материал постепенно будет переходить в другой. Для этого применят либо склеивающие промежуточные пленки, либо клей, проникающий глубоко в материал. Тогда клеями будут пользоваться гораздо шире, чем сейчас. И одежду, наверное, будут не шить, а склеивать. И тогда потребуется не распарывать, а удалять клей растворителем.

Непрерывно будет совершенствоваться и бумага. Она станет более прочной. В будущем для приготовления бумаги из древесины будут извлекать целлюлозу, почти ее не разрушая, во всяком случае разрушая гораздо меньше, чем сейчас. Чтобы получить очень прочную, эластичную, немнущуюся бумагу, в бумажную массу добавят синтетические волокна, а потом проклеят бумагу синтетическими полимерами. Такая бумага станет похожа на тонкую ткань. Так, вероятно, создастся непрерывный переход от бумаги к текстильным материалам, особенно нетканым, о которых уже говорилось. Конечно, в будущем бумагу станут использовать и для одежды, легкой, красивой, необычно дешевой. Такую одежду будут надевать один или несколько раз.

Изменится и вид жилищ. Полы уже сейчас покрывают эластичным материалом из полихлорвинила. В будущем стены и потолки будут делать из слоистых пластиков — слоев бумаги или ткани, пропитанных полимерным связующим. Такие материалы не только красивы — к ним не пристает пыль, они легко моются. Широко будут применяться и армированные пластики, особенно для легких зданий. Для легких построек будут использоваться тонкие и толстые пленки. Сейчас такие дома-палатки из пленки, натянутой на каркас, недолговечны. Их разрушает влага, ветер, солнце. Но со временем создадут долговечные полимерные пленки — пленки, которые станут служить в естественных условиях десятки лет. И тогда множество легких жилищ и в теплых краях, и на далеком севере будут делать из пленок!

Может быть, в будущем появятся и такие дома, что их и строить не придется. Для несущего каркаса химики изготовят очень прочные тонкие полимерные трубки, для простенков — хорошо сохраняющие тепло стены из полимерных гибких слоистых материалов с заранее вмонтированными окнами из прозрачных пластиков. Такой дом можно целиком изготовить на заводе. Его привезут в сложенном виде на место, накачают в трубки под большим давлением сжатый воздух. Трубчатый каркас расправится, приобретет необходимую жесткость, растянет стены, и, как в сказке, красивый, светлый, теплый и просторный дом вырастет сам.

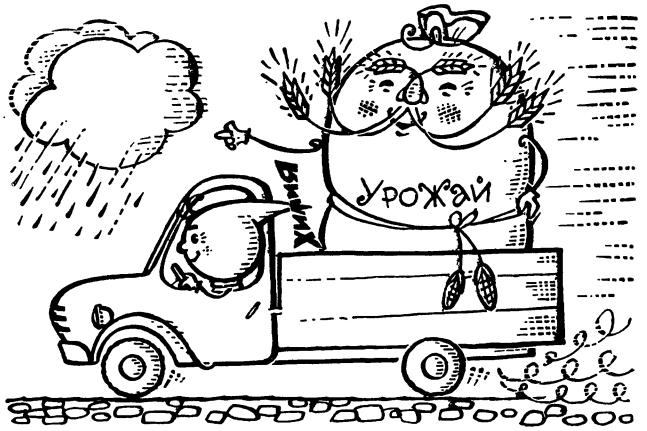
Конструкторы рассчитали, что из такой трубчатой надувной арматуры можно будет возводить даже башни высотой более километра, а может быть, и выше. Чтобы снизить вес, каркас будут надувать водородом или гелием. Но прежде химикам придется создать высокопрочные и газонепроницаемые полимерные трубки.

## ПОЛИМЕРЫ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Уже сейчас известны полимеры, в первую очередь полиакрилаты и полиамиды, которые способны как бы срастаться с тканями живых организмов. В будущем количество таких полимеров увеличится. А это даст возможность заменять поврежденные сухожилия, части кровеносных сосудов эластичными и прочными полимерными пленками или тканями. Возможна и замена зубов. Искусственный зуб с корнями, сделанный из твердого полимерного материала точно по форме удаленного зуба, сможет врасти на месте естественного зуба.

Не менее интересна и возможность склеивания сломанных костей полимерными клеями. Пострадавший сможет пользоваться поврежденным органом вскоре же после перелома, а клей со временем рассосется, заменяясь соединительной костной тканью. Наверное, широко будут применять искусственную кровь, которая сможет выполнять все основные функции крови и, главное, переносить кислород от легких ко всем тканям организма. Быть может, удастся решить и проблему искусственной почки. Почки очищают кровь от ненужных примесей. Для осуществления такого процесса нужно иметь полупроницаемую полимерную пленку, которая пропускала бы удаляемые примеси и задерживала бы остальные части крови. Когда удастся создать такие пленки — модели пленок, существующих в живых организмах, тогда можно будет перейти и к модели самого органа — почки.

Со временем люди научатся получать полимерные вещества, вырабатываемые только в организмах, в первую очередь ферменты, хотя бы простейшие. Такие синтетические полимерные вещества явятся важной группой лекарств. Они смогут влиять на разнообразные процессы жизнедеятельности так, как на них влияют ферменты, гормоны и другие биологически активные соединения. Научившись синтезировать подобные очень сложные по своему строению полимерные вещества, химики попытаются осуществить процессы, протекающие пока лишь в организмах. Наиболее важный из них — это фиксация азота, т. е. поглощение азота из воздуха и превращение его в различные химические соединения. Сейчас простейшим методом фиксации атмосферного азота служит получение аммиака реакцией между азотом и водородом при температуре около 400° и давлении 700 *атм* в присутствии катализатора. Более дорогой метод — получение соединений азота с кислородом в электрической дуге уже при совсем высоких температурах. А микроорганизмы осуществляют фиксацию азота при обычных температуре и давлении! И это происходит, несомненно, при помощи сложных полимерных катализаторов — ферментов. Когда ученые поймут весь механизм подобных процессов и научатся осуществлять их при помощи синтетических полимерных веществ, появится и новая область химии, основанная на использовании тех процессов, которые сейчас происходят только в живых организмах.

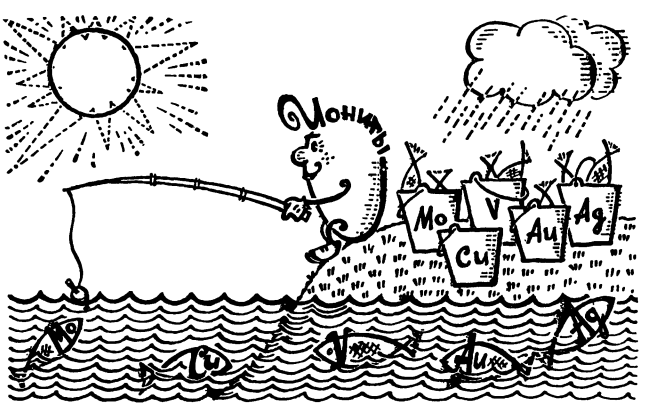



**Среди созданных химиками полимеров есть и такие, которые, по-видимому, помогут переустроить систему земледелия и все сельское хозяйство.**

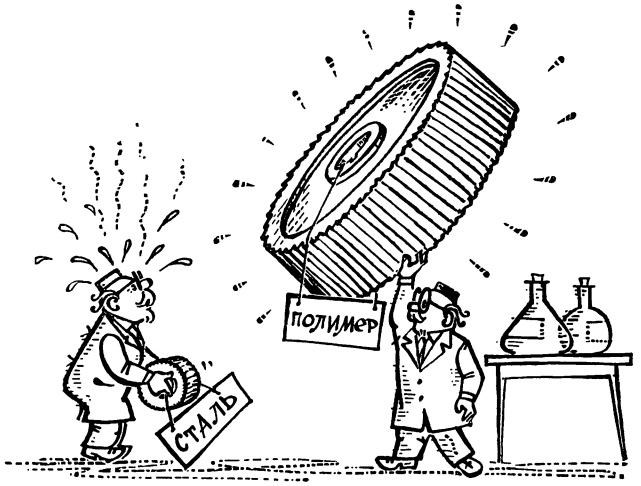
Второй пример таких процессов — фиксация растениями углекислоты и ее превращение в первую очередь в углеводы. Этот процесс в растениях происходит под действием света в обычных условиях, но он, конечно, будет осуществлен при помощи синтетических полимеров, похожих на биополимеры.

Среди созданных химиками полимеров есть и такие, которые, по-видимому, помогут перестроить систему земледелия и все сельское хозяйство. С первого взгляда их роль и назначение очень скромны и незаметны: они просто обладают способностью изменять структуру тонко измельченных веществ, собирая и склеивая их частицы в более крупные комочки. Если вносить такие полимерные добавки в почву, создается комковая структура, а это очень повышает плодородие почвы. Возможно, в будущем химики найдут такие структурообразующие полимеры, которые позволят создать чрезвычайно благоприятные условия для корневого питания растений.

Все шире в химии будут распространяться полимерные реагенты. Уже сейчас существует




**Комплексонные полимерные реактивы (иониты) смогут извлекать нужные металлы из растворов очень малых концентраций, даже из морской воды.**




**Возникнет множество полимеров, которые сейчас трудно предугадать, и полимеры станут так же необходимы людям, как ранее необходимы были камень и металлы.**

громадное количество полимерных соединений, среди которых представлены почти все классы органических веществ. Есть полимерные кислоты и основания, полимерные спирты, альдегиды и кетоны, разнообразные ароматические и гетероциклические полимерные соединения. Они могут реагировать с другими веществами, подобно тому как происходят химические реакции в среде обычных низкомолекулярных веществ. Но здесь одним из продуктов происходящих реакций будет полимерное вещество. А полимерное вещество легко отделить от реакционной среды, и это создает новые химические возможности. Например, мы имеем соль какой-либо кислоты и хотим получить из нее самое кислоту. Можно прибавить к такой соли более сильную кислоту. Она вытеснит интересующую нас кислоту, но при этом получится смесь кислоты и образовавшейся соли. Разделить такую смесь обычно нелегко. Если же мы возьмем полимерную кислоту в виде зерен, пленок или волокон и пропустим через такую нерастворимую полимерную массу раствор соли, то получится полимерная соль и чистая кислота. Мы обменили ионы водорода в полимерной кислоте на катионы соли и легко отделили полимерный реагент.

Такие полимерные реагенты — кислоты и основания — так и называются *ионообменными смолами*. Они уже сейчас применяются достаточно широко. В будущем появится много разнообразных полимерных реагентов — окислителей и восстановителей. Чтобы окислить или восстановить какое-либо соединение, достаточно будет пропускать его через слой зерен или волокон полимерного реагента-электронообменника. Такое название дано этой группе веществ потому, что окисление или восстановление всегда связаны с обменом электронов.

Еще шире будет применяться другая группа этих реагентов — *комплексонные смолы*. Они способны образовывать комплексы с определенными металлами. Такие комплексонные полимерные реактивы в виде пленок или волокнистых материалов смогут извлекать нужные металлы из растворов очень малых концентраций, даже из морской воды. Ведь в будущем, когда богатые месторождения будут выработаны, придется извлекать металлы из более бедных месторождений. И новые полимерные реагенты дадут возможность построить иные методы добычи цветных и редких металлов.

Возникнет еще много новых типов полимеров. *Светочувствительные* полимеры, дающие сразу рельефное изображение, смогут применяться в фотографических и полиграфических процессах. Полимерные проводники и полупроводники, особенно плавкие и растворимые,— очень удобный тип электротехнических материалов. Полимерные электролиты станут неотъемлемыми частями химических источников тока— аккумуляторов, элементов и особенно топливных элементов, способных превращать химическую энергию топлива в электрическую. Ученые найдут стойкие и активные полимерные поверхностно-активные вещества, которые будут создавать и разрушать суспензии и эмульсии, регулировать испарение воды с поверхности водоемов. Возникнут полимерные вещества, способные обеспечивать идеальное скольжение или громадное сцепление поверхностей, т. е. фрикционные полимерные материалы. Возникнет множество полимеров, которые сейчас трудно предугадать, и полимеры станут так же необходимы людям, как ранее необходимы были камень и металлы.

■

# ХИМИЯ ЖИЗНИ И ЗДОРОВЬЯ

Когда появилась потребность в химии как подлинной науке, объединяющей практические сведения о превращениях веществ, возник вопрос: чем конкретно она должна заниматься, в чем должна помогать людям?

Тогда же была сделана попытка ограничить задачи химии только помощью врачам в изготовлении всевозможных лекарств и снадобий. Но для неокрепшей науки такая задача была непосильной.

Связь между строением молекулы какого-либо вещества и действием ее на живой организм оказалась настолько сложной, что планомерная работа по изобретению лекарственных веществ, так называемая рациональная химиотерапия, стала возможной лишь при высоком уровне развития химической науки. Преждевременно было навязывать химии медицинские цели тогда, когда она только выходила из мрака алхимических подземелий.

## ОСОБЕННОСТИ ДЕЙСТВИЯ ВЕЩЕСТВ НА ЖИВОЙ ОРГАНИЗМ

О трудностях, особенно характерных для данной области химического синтеза, полезно составить наглядное представление, прежде чем знакомиться с ее удивительными достижениями.

Первая трудность состоит в том, что живой организм оказывается очень разборчивым даже к самым незначительным изменениям в строении молекулы вещества. Вот характерный пример.

К числу веществ, молекулы которых существуют в виде двух оптических изомеров, похожих друг на друга, как предмет на свое отражение в зеркале, относится адреналин. Иначе говоря, существует не один, а два адреналина: «левый» и «правый» (рис. 1— цв. табл. к стр. 497). Оба имеют одну и ту же структурную формулу, одинаковы по внешнему виду, у них один и тот же удельный вес, одна и та же точка плавления, растворимость и пр. И все же это два различных вещества, и они по-разному действуют на живые организмы.

Адреналин играет очень важную роль в химическом «хозяйстве» живых организмов — животных и человека. Его широко применяют врачи при падении кровяного давления, ослаблении деятельности сердца и во многих других случаях. Адреналин был синтезирован химиками спустя всего 4 года после его выделения в виде бесцветных кристаллов из надпочечников быка. Но действие синтетического адреналина оказалось намного слабее, чем природного. Почему? Потому, что при химических реакциях получаются и «левые» и «правые» его молекулы, причем те и другие в одинаковом количестве. Действуют же на симпатическую нервную систему практически только молекулы одного вида.

Еще более разительный пример представляет самый популярный из витаминов — витамин С. Его химическое название — аскорбиновая кислота. И она существует в двух формах: «левой» и «правой». В плодах шиповника вырабатывается «левая» аскорбиновая кислота, она и поступает в аптеки под названием витамина С. А ее зеркальный «двойник» — «правая» аскорбиновая кислота,— оказывается, обладает прямо противоположным действием на организм: это антивитамин, он не усиливает, а подавляет, сводит на нет деятельность витамина С.

Итак, живой организм оказывается иногда чрезвычайно чувствительным к малейшим изменениям в строении молекулы веществ, с которыми он сталкивается. Это одна из особенностей воздействия веществ на живые организмы.

Другая особенность заключается в необычайной силе действия. Тот же адреналин явственно действует при введении его в кровь в концентрации 1 : 1 000 000 000. Еще один пример: тироксин (рис. 2— цв. табл. к стр. 497), образующийся в щитовидной железе млекопитающих. В 1927 г. он был получен искусственно, после чего стали изучать действие тироксина на живые организмы. Оказалось, что впрыскивание десятой, даже сотой доли миллиграмма тироксина в кровь головастика ускоряет превращение его (как и любой другой личиночной формы животных) во взрослую форму. Так как накопление вещества в организме головастика не успевает следовать за ненормально быстрым превращением, получаются удивительные «карликовые» лягушки.

Химия пришла на помощь медицине, предоставив ей лекарства, полученные случайно (например, хлороформ). Затем она вступила на путь синтеза лекарственных веществ, содержащихся в природных (растительных и животных) материалах. Наконец, были созданы новые сильнодействующие лекарства, не существующие в природе в готовом виде. Рациональная химиотерапия не смогла бы возникнуть, если бы структурная теория не осветила путь к ней.

## МОЛЕКУЛЫ ПРОТИВ МИКРОБОВ

Большинство самых тяжелых недугов человека возникает в результате проникновения в его организм различных микробов или вирусов.

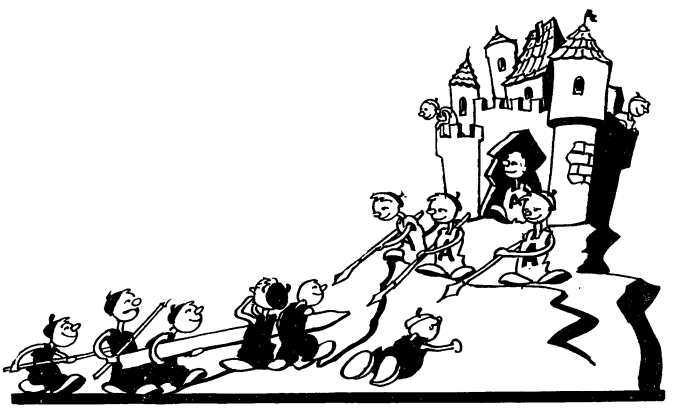


**Рис. 1. Антисептики подобны заградительному отряду, отражающему натиск врага на подступах к крепости.**

Важным событием в истории медицины была первая операция с применением антисептического (обеззараживающего) вещества, которую сделал в середине XIX в. английский хирург Листер. Антисептиком служила карболовая кислота — один из продуктов сухой перегонки каменного угля. До применения антисептиков даже легкие операции приводили иногда к смерти. Рану заражали микробы. Теперь же эта угроза рассеялась и смертность от хирургических операций резко снизилась.

Так был достигнут один из первых успехов в отражении атак микробов еще на подступах к живому организму. Но как уничтожить бактерии, которые проникли в организм, пока еще не знали. Карболовая кислота, убивая микробов, не щадила и живую ткань. Естественно, возникла идея так «отрегулировать» молекулу лекарственного вещества, чтобы, «стреляя» в микроба, не «попасть» в живую ткань.

Около 300 лет назад в Европу впервые привезли кору хинного дерева. Из коры был выделен хинин — белый горький порошок, исцеляющий от губительной лихорадки. Со временем химики разгадали строение молекулы хинина и получили его искусственно. Однако дешевых способов синтеза не найдено и до сих пор.

Зато изучение действия хинина на больных малярией открыло путь рациональной химиотерапии. В 1860 г. русский врач Романовский, рассматривая в микроскоп каплю крови больного, увидел, как разрушаются тела малярийных плазмодиев от действия хинина. В этом исследовании родилась основная формула рациональной химиотерапии: наилучшим лекарством против всякой болезни будет то вещество, которое окажет наименьший вред организму больного и вызовет наибольшие разрушения в болезнетворных организмах.

**Рис. 2. Если врагам удалось ворваться в крепость, то основным девизом химиотерапии становится: поражать микробы, щадя живую ткань.**

Естественно, у химиков возник вопрос, достаточно ли молекула хинина отвечает этому требованию, не нуждается ли она в усовершенствовании. Действие хинина удалось видоизменить и отчасти усилить путем некоторых изменений в молекуле (рис. 3 — цв. табл. к стр. 497). Внимание химиков было обращено на наиболее доступную для перестроек ее часть, обозначенную буквой *A*. Сюда можно присоединить через атом кислорода цепочку из любого числа углеродно-водородных звеньев $CH_2$.

И вот что оказалось. Если цепочка состоит из двух звеньев (оптохин), то получается химическое оружие против наших невидимых врагов — пневмококков, которые вызывают воспалительные процессы в легких. Стоит увеличить число звеньев до 5 (эукупин) — и получается средство, мало действующее на пневмококки, зато весьма активное против возбудителей рожи и других кожных заболеваний. Еще одна «пристройка»: присоединяется 8 звеньев — и возникает новое лекарство (вуцин), губительное для стрептококков. При дальнейшем накоплении звеньев действие на микробы исчезает.

Великий немецкий ученый Эрлих, много работавший над изобретением лекарственных веществ, недаром сравнивал отношение лекарств к живому веществу с отношением ключей к замкам. Усовершенствованные химией молекулы хинина вполне можно сравнить с обычным ключом, от числа зарубок на котором (соответственно числу углеродно-водородных звеньев в «хвосте» молекулы) зависит, отопрет или не отопрет он данный замок. Исследователю иногда нужно перебрать тысячи «ключей», прежде чем будет найден тот, который нужен.

У медицины сейчас громадное число синтетических веществ для уничтожения уже поселившихся в организме болезнетворных микробов. Лучшие из этих веществ были построены по заранее продуманному плану. Очень остроумно была, например, использована идея «рельсов». Для того чтобы «проложить путь» к тем или иным микробам, использовались молекулы веществ, обладающих химическим сродством к данному виду микроба, и к этим молекулам прицеплялась токсофорная группа атомов («токсофорный» в буквальном переводе — «несущий яд»), как заряд пироксилина к самодвижущейся торпеде. Кстати сказать, эту идею подсказала способность каждого вида микробов интенсив-

но окрашиваться определенными красителями, т. е. сильно и при этом избирательно поглощать их.

Так, исходя из структурной формулы хинина, в лабораториях были созданы новые лекарства, которые убивают болезнетворные микроорганизмы и не вредят живой ткани.

Ну, а малярия, в борьбе с которой были заложены основы рациональной химиотерапии? Руководствуясь общей идеей «архитектурного» плана молекулы хинина, в Германии и в СССР были созданы чисто синтетические противомалярийные препараты — акрихин, плазмохин и плазмоцид. Они равноценны природному хинину и почти полностью заменили его.

Структурная формула плазмохина (рис. 3— цв. табл. к стр. 497) показывает, какое близкое родство у искусственных противомалярийных лекарств с природным хинином. Общая всем им часть молекулы изображена на зеленом фоне; надстройка сверху (вместо атома водорода) относится к хинину; пристройка снизу (вместо атома водорода) — к плазмохину.

## ОТ КРАСОК К ЛЕКАРСТВАМ

В настоящее время одно из первых мест среди химических средств борьбы с микробами занимают так называемые сульфаниламидные препараты. История их открытия поучительная. В начале XX в. химики искали новые пути синтеза красителей, причем в качестве исходного продукта брали сульфаниловую кислоту — чрезвычайно удобное для самых разнообразных перестроек вещество.

Поиски новых красителей увенчались блестящим успехом. Но до 1935 г. никто не подозревал, что получающиеся при синтезах продукты представляют собой грозное оружие против очень опасных микробов. Когда же это обнаружилось, поиски приняли новое направление. Химики синтезировали один сульфаниламидный препарат за другим и передавали их в руки медиков, а врачи тотчас же проверяли действие нового препарата на искусственно зараженных разными микробами животных. Масштабы работы были огромны. Один за другим синтезировались многие тысячи препаратов, чтобы отобрать из них десяток-другой наиболее успешно действующих. Сейчас широко известны названия таких веществ: сульфидин, стрептоцид, сульфазол, сульфадимезин. Все они получаются из сульфаниловой кислоты замещением в ней атома водорода (отмечен звездочкой) на тот или иной радикал (рис. 5— цв. табл. к стр. 497) и объединяются под стеклом аптечной витрины общим названием «сульфамиды».

Зная строение молекул, химики могли не только создавать новые лекарства, но и понять, как именно эти лекарства действуют. Микробы нуждаются в витаминах. Таким витамином для них служит парааминобензойная кислота. Она присутствует в нашей крови в ничтожных количествах. Если бы ее не было совсем, поселившиеся в нас микробы не погибли бы, но перестали бы размножаться.

Теперь сравните строение молекул парааминобензойной, сульфаниловой кислот и сульфидина (рис. 5— цв. табл. к стр. 497). Сходство их бросается в глаза. Мы уже сравнивали отношение лекарств к живым организмам с отношением ключей к отпираемым ими замкам. Представим себе, что молекула парааминобензойной кислоты — это настоящий «ключ», а молекула сульфидина — «ключ» поддельный. Он вошел в замочную скважину, но не отпер замок, а застрял в нем так прочно, что его не открыть и настоящим ключом. Примерно так мы и представляем себе действие сульфамидных препаратов на микробы. Бактерия ассимилирует «по ошибке» вместо парааминобензойной кислоты сходные с ней молекулы сульфамидного препарата. Теперь необходимо лишь поддерживать в организме достаточную концентрацию лекарства, чтобы он мог расправиться с парализованными, но еще живыми микробами.

Если микроб не нуждается в парааминобензойной кислоте, то он не поддается действию сульфамидных лекарств, и поиски химического оружия против него должны идти в другом направлении.

Еще в XIX в. было известно целебное действие салициловой кислоты при ревматизме. Но, пока ее с большими трудностями добывали только из растительного сырья, она была очень дорога. В 1874 г. нашли простой способ превращать в салициловую кислоту фенол путем внедрения в его молекулу молекулы угольного ангидрида (рис. 4— цв. табл. к стр. 497). Это был первый синтез природного лекарственного вещества. С него началось промышленное производство как самой салициловой кислоты, так и других лекарств, образующихся путем усложнения ее молекулы: это утоляющий боль и понижающий жар аспирин, салол, дезинфицирующий кишечник, и т. д. Как оружие против микробов салициловая кислота малоэффективна.

Но в числе ее производных оказался и ПАСК — препарат, останавливающий рост

и размножение смертоносной туберкулезной палочки. Сравните ПАСК с парааминобензойной кислотой, и вам опять-таки бросится в глаза сходство в строении их молекул. Поэтому к ПАСКу можно прийти и от салициловой и от парааминобензойной кислот. Второй путь легче, и он предпочитается, потому что сама парааминобензойная кислота легко синтезируется из толуола, одного из отходов коксования углей.

Из той же парааминобензойной кислоты получают анестезин и новокаин. Эти вещества замечательны не своим действием на микробы, а действием на организм. Они временно отключают нервы, посылающие в мозг сигналы боли, от места, в котором ощущение боли рождается. Оперируемый находится в полном сознании, он все видит и слышит, но может даже не чувствовать прикосновения скальпеля хирурга к своему телу.

Для местной анестезии впервые был применен кокаин — природный продукт, получающийся из листьев тропического кустарника кока. Но применение кокаина в медицине ограничено вследствие его высокой токсичности. Поэтому лишь с заменой кокаина синтетическим продуктом — новокаином — проблема местной анестезии была решена.

Так созидающая химия сыграла важную роль в разрешении одной из основных задач хирургии—обезболивание при операции. В химическом, а отсюда и в производственном родстве через сульфаниловую кислоту оказываются лекарственные вещества самого различного назначения.

Но возвратимся к микробам. Наиболее мощные из современных лекарств, т. е. наиболее убийственные по отношению к микробам и безвредные для организма человека,— это антибиотики. Таков общеизвестный пенициллин, извлекаемый из зеленой плесени. Достаточно ввести 1/1000 *мг* пенициллина в 1 *мл* крови, чтобы остановить развитие микробов. И с антибиотиками повторилась обычная история. Установлено их строение, осуществлен синтез, и ряд антибиотиков уже производится не из их природного источника — живых клеток, а на химических заводах. Что же касается признанного «короля» антибиотиков — пенициллина, то он переживает сейчас в химических лабораториях как бы второе рождение. Подобно молекуле хинина, молекула пенициллина состоит из основного ядра и пристроенной к нему углеводородной цепочки. У пяти природных пенициллинов ядро одно и то же, а цепочки (отсюда и эффективность действия) разные. Распоряжаясь цепочками, как при усовершенствовании молекулы хинина, химикам удалось создать новые «расы» этого антибиотика, преодолев в них природные недостатки пенициллина: неустойчивость против кислот (что препятствует приему пенициллина внутрь) и быстрое выбрасывание пенициллина почками (что заставляет все время поддерживать «боевую» концентрацию пенициллина в организме частыми повторными уколами).

## УСЫПЛЯЮЩИЕ ЛЕКАРСТВА

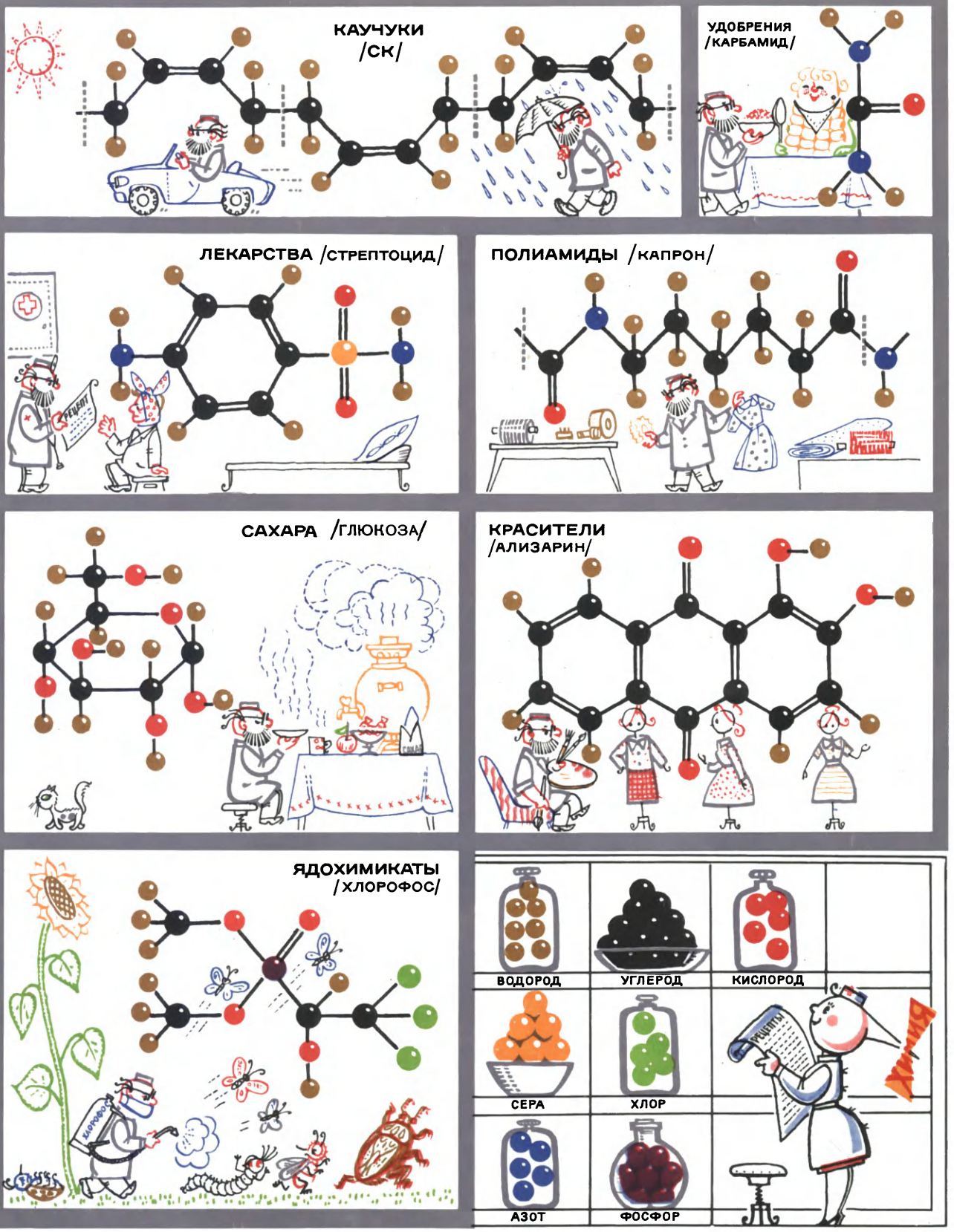
Не все недуги проистекают от вторжения в наш организм микробов и вирусов. Многие болезни вызваны нарушением нормального хода тех или других естественных процессов, из которых слагается жизнь. И здесь созидающая химия, опираясь на изучение строения молекул, пришла на помощь медицине.

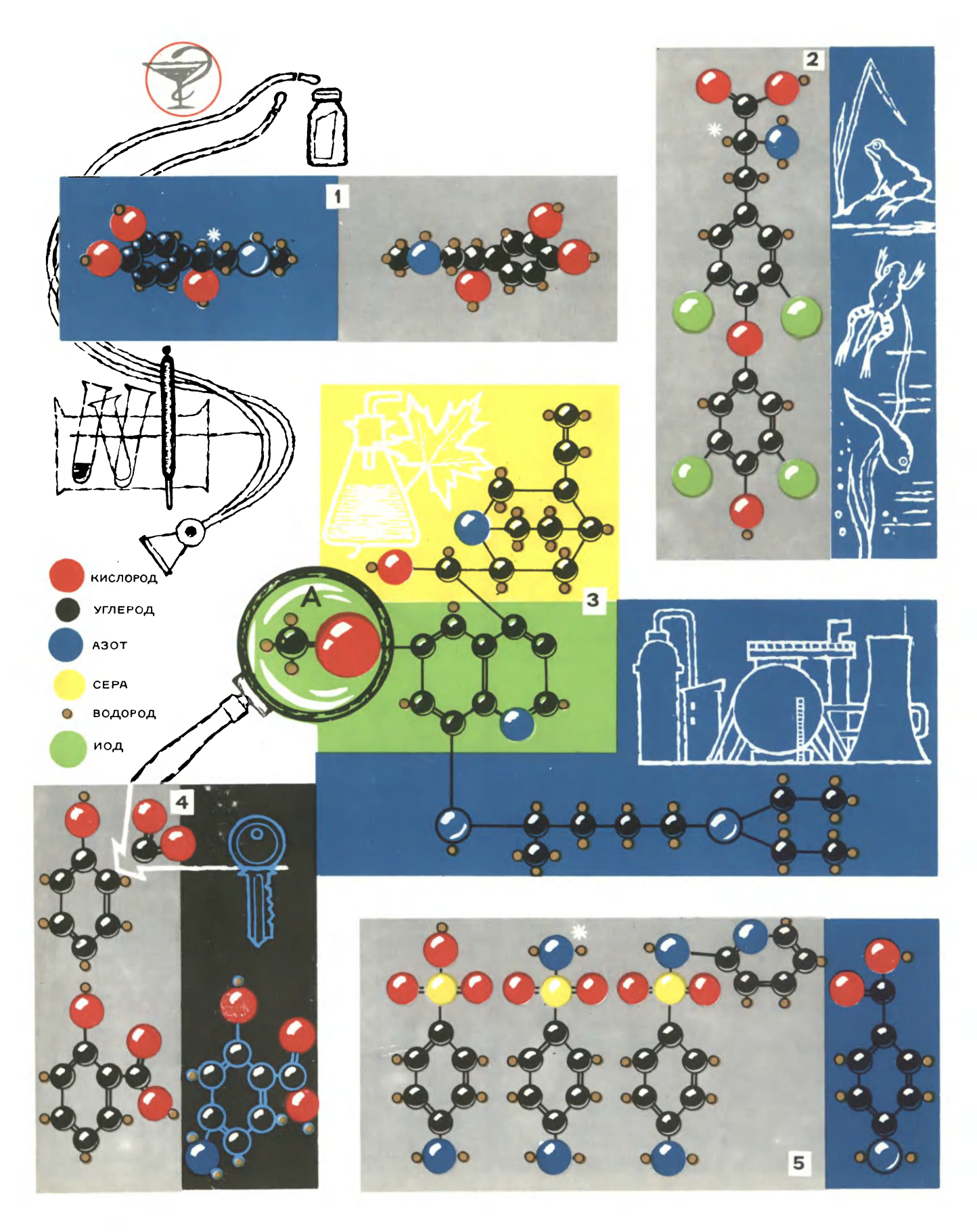
Наш организм нуждается в периодическом отдыхе, который мы называем сном. К счастью, не так уж много людей испытало на себе, как мучительно страдать бессонницей и к каким тяжелым последствиям это ведет. Каким же благодеянием было открытие снотворного действия барбитуровой кислоты (рис. 3)! Звездочкой обозначены атомы водорода, особенно легко замещаемые другими атомами или атомными группами. И вместо одного врачи получили из рук химиков целый набор снотворных веществ. Одни из них действуют тотчас же после приема, но вызывают кратковременный сон, другие вызывают сон средней продолжительности. А некоторые применяются для лечения длительным сном.

В сущности говоря, снотворные вещества — это уже вторжение химии в человеческую психику. Но найдены и более тонкие способы воздействия на психику химическими средствами: пришло время говорить о зарождении нового вида химиотерапии — психохимиотерапии. Так, существуют два разных вещества с близко сходным химическим строением. Поскольку «ядро» их молекул одно и то же, одинаково и их действие на психику: оба они «снимают» депрессию — чувство подавленности, тоски и страха, но наблюдается и различие, связанное с различием строения молекул в деталях: один препарат

*Таблица к статье «Органические вещества вокруг нас»*

**Теория строения органических соединений помогает человеку создавать самые разнообразные вещества.**


КАУЧУКИ
/СК/
УДОБРЕНИЯ
/КАРБАМИД/
ЛЕКАРСТВА /СТРЕПТОЦИД/
РЕЦЕПТ
ПОЛИАМИДЫ /КАПРОН/
САХАРА /ГЛЮКОЗА/
САХАР
КРАСИТЕЛИ
/АЛИЗАРИН/
ЯДОХИМИКАТЫ
/ХЛОРОФОС/
ХЛОРОФОС
ВОДОРОД
УГЛЕРОД
КИСЛОРОД
СЕРА
ХЛОР
АЗОТ
ФОСФОР
РЕЦЕПТЫ
ХИМИК


1
2
3
4
5
КИСЛОРОД
УГЛЕРОД
АЗОТ
СЕРА
ВОДОРОД
ИОД

лечит «беспричинную» депрессию органического происхождения, а другой — угнетенное состояние психики, порожденное внешними обстоятельствами.

## ЖИЗНЕННЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ

Еще в 1880 г. русский исследователь Н. И. Лунин поставил поразительный опыт. Он рассадил белых мышей в две клетки и назначил одним обычную молочную диету, других же кормил искусственным молоком: оно было составлено из очищенных веществ, входящих в состав натурального молока,— казеина, жира, молочного сахара и солей. В первой клетке мыши чувствовали себя прекрасно, во второй — гибли одна за другой. Вывод напрашивался сам собой: в натуральном молоке, кроме перечисленных, присутствуют в ничтожном количестве какие-то неизвестные вещества, столь же необходимые для жизни.

Впоследствии эти вещества были названы в и т а м и н а м и. Недостаток их в пище приводит к тяжелым заболеваниям и гибели животных и людей. Самое удивительное в витаминах то, что они оказывают свое действие, находясь в пище в ничтожных, едва поддающихся химическому учету количествах. Суточная потребность человека в том или ином витамине выражается миллиграммами или даже долями миллиграмма. Организм животных и человека сам не вырабатывает витаминов, а получает их главным образом из растительной пищи (см. т. 4 ДЭ, ст. «Витамины»).

Итак, перед химиками встала привычная задача: извлечь из растительного продукта содержащийся в нем витамин, установить его структурную формулу и, руководствуясь ею, синтезировать витамины из каких-либо дешевых и доступных материалов. Малейшая ошибка в установлении структуры молекулы витамина или малейшая неточность в воспроизведении этой молекулы искусственным путем приводит подчас к тому, что весь труд пропадает даром.

*Таблица к статье «Химия жизни и здоровья»*

*1.* «Левый» и «правый» адреналин. *2.* Тироксин. *3.* Структура хинина и плазмохина. *В центре* рисунка, на зеленом фоне, выделена общая хинину и плазмохину часть молекулы. *4.* В молекулу фенола внедряется молекула угольного ангидрида (*вверху*); получается салициловая кислота (*внизу*); еще одна перестройка — и перед нами ПАСК (на черном фоне). *5.* Последовательно представлены структуры молекул: сульфаниловой кислоты, ее амида, сульфидина, а на синем фоне — парааминобензойной кислоты.

Звездочкой обозначены атомы водорода, которые особенно легко замещаются другими атомами или атомными группами.

Случается даже, что при этом вместо витамина получается его противоположность — антивитамин. Здесь повторяется история с «фальшивыми ключами». Таким фальшивым ключом — антивитамином по отношению к витамину С — является его зеркальный «двойник» — «правая» аскорбиновая кислота.

За последние два-три десятка лет установлена химическая природа многочисленных природных витаминов и синтезированы сотни органических соединений, обладающих витаминными и антивитаминными свойствами. Эти драгоценные вещества, очень скупо рассеянные в природе, сейчас тоннами получают на заводах.

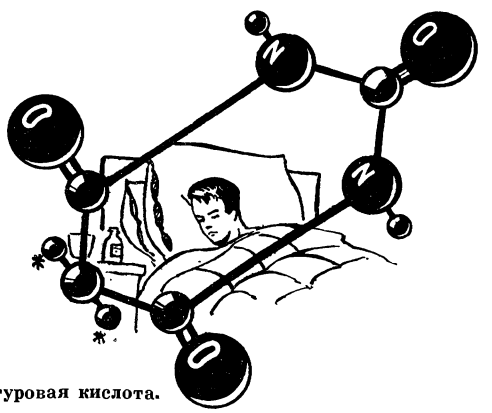



**Рис. 3. Барбитуровая кислота.**

В прошлом вспышки авитаминозов — болезней от недостатка витаминов — были обычным явлением. Еще и сейчас авитаминозы поражают бедные слои населения даже в такой богатой капиталистической стране, как США. В Советском Союзе массовых авитаминозов нет. В этой победе выдающаяся роль принадлежит нашей химии.

Сходную с витаминами роль в нашем организме играют г о р м о н ы. В самом начале статьи мы познакомились с двумя из них — адреналином и тироксином. Гормоны — это химические регуляторы жизненных функций нашего организма. Предположим, что внезапно вас что-то сильно испугало или рассердило. Тотчас по сигналу из мозга надпочечная железа выдавливает в кровь незначительную капельку адреналина. Под его влиянием тонкие кровеносные сосуды, доставляющие кровь мышцам рук и ног, расширяются, сердце начинает биться учащенно и сильно. Весь организм приведен в состояние готовности энергично реагировать на угрожающую ему опасность.

В отличие от витаминов гормоны не поступают в живой организм извне. Они вырабатываются в самом организме, в специализированных «фабриках» — железах внутренней секреции. Понятно, что нужда в том или другом гормоне у животного и человека может возникнуть лишь в случае нарушения нормальной деятельности соответствующей железы. И это случается.

Пока гормонами не занялась созидающая химия, эти вещества, как и витамины, получали с величайшим трудом из организмов животных. При этом приходилось перерабатывать многие тонны сырья, чтобы получить миллиграмм гормона — столько, сколько весит булавочная головка. А когда было установлено строение их молекул, то стало сравнительно легко находить пути их искусственного получения, а затем и усовершенствования. Сейчас гормоны применяют не только для лечения людей, но и для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных.

Прошло немногим более ста лет после того, как научный мир был ошеломлен известием, что искусственным путем в обыкновенной химической колбе впервые получено органическое вещество — мочевина. И вот сегодня уже не в отдельных колбах, а в реакторах химических заводов получают витамины и гормоны — вещества, принимающие самое непосредственное, самое деятельное участие в жизненном процессе.

## НА ПУТИ К ИСКУССТВЕННОМУ СОЗДАНИЮ ЖИЗНИ

В искусстве мало ценятся художники, весь талант которых заключается в умении подражать чужим, хотя и действительно прекрасным образцам. Искусство создавать что-то совершенно новое несравненно ценнее и почетнее, чем искусство копировать и подражать.

...Мы давно перестали видеть что-то особенно замечательное в том, что многие продукты лаборатории тождественны с теми или другими произведениями природы. Скорее мы склонны увлечься идеей создания веществ, которых в природе нет и не может быть.

Но в одной области искусство человека отстало от искусства природы. Здесь мы еще остаемся подражателями и учениками. Химик может искусственно создавать важнейшие разновидности жиров и углеводов. Он проник в строение белковых веществ, из которых состоит мозг, мускулы, кожные покровы — весь организм людей, животных и других живых существ, вплоть до микробов и вирусов. Простейшие, подобные белкам вещества давно воспроизведены в лаборатории.

Практическое значение открытий в этой области науки, казалось бы, должно быть особенно ценным для пищевой промышленности. Умение создавать основные пищевые вещества, исходя, если нужно, из элементов, могло бы перевернуть все дело питания. Но природа поставляет нам белки, жиры и углеводы за несравненно более дешевую цену. Живые организмы — сложнейшие «фабрики», которые возникли и усовершенствовались не в один или два года, а создавались миллионы лет.

Белки входят в состав нашего организма в виде массивных молекул с громадными молекулярными весами, примерно от десяти тысяч и до нескольких миллионов единиц. В нашем теле содержатся тысячи различных белков, каждый из которых имеет свое особое строение и выполняет свою особую роль в жизнедеятельности организма.

При кипячении со щелочами и кислотами громадные молекулы белков расщепляются на мелкие молекулы аминокислот — так плохо скованные цепи распадаются на отдельные звенья. Аминокислоты и являются теми звеньями, из которых слагаются молекулы всех белков. На рисунке 4 представлена структура молекулы простейшей из аминокислот, так называемого глицина. В рамки заключена та группировка атомов, которая сохраняется во всех белковых аминокислотах. Остальные из числа важнейших природных аминокислот, на которые расщепляются природные белки, отличаются от этой лишь тем, что один водородный атом замещен той или другой несложной группой атомов.

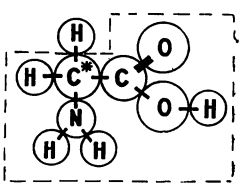


Рис. 4.

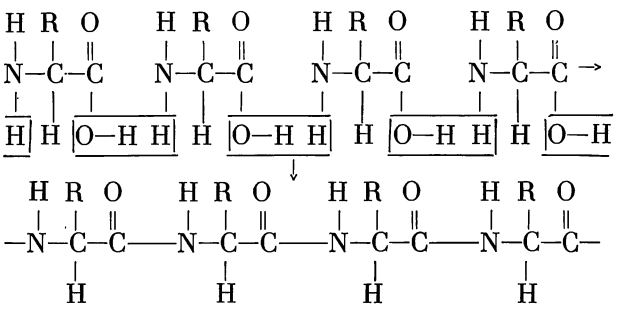
Это замещение имеет замечательное последствие: отмеченный звездочкой атом углерода становится асимметрическим, т. е. появляется возможность существования молекулы в двух вариантах — «левом» и «правом». Но особенно поразительно другое. Каков бы ни был источник природной аминокислоты — любой растительный или животный вид, любой вид бактерий, молекулы всех природных аминокислот оказываются «левыми»; «правые» аминокислоты в живой природе обнаружены лишь в антибиотиках.

То, что происходит с белками в химической колбе, происходит и в природной «колбе» — в желудке: белки расщепляются в нем на аминокислоты. Маленькие молекулы аминокислот легко проникают через стенки желудка в кровь и разносятся по тканям организма, где вновь сцепляются в молекулы белков. Значит, нам не обязательно питаться белками, можно питаться и непосредственно аминокислотами? Не обязательно даже, чтобы белковая пища попадала в желудок, можно впрыскивать раствор аминокислот прямо в кровь? Именно так и поступают врачи, когда больной страдает настолько глубоким расстройством пищеварения, что его желудок отказывается переваривать белковую пищу.

Не обязательно также, чтобы в аминокислотной диете содержались все природные аминокислоты. Мы нуждаемся лишь в 9 из них, остальные наш организм может готовить сам. Низшие же организмы способны вырабатывать для себя все необходимые аминокислоты из неорганических веществ.

Белковая пища полноценна, когда в ней содержатся все 9 необходимых аминокислот. Таков творог. Если в белковой пище недостает тех или иных аминокислот, она неполноценна. Например, в желатине (белке), образующемся при вываривании костей, недостает трех из числа необходимых человеку аминокислот.

Сцепление молекул аминокислот в цепочкообразные молекулы белка осуществляется в тканях нашего организма путем отщепления воды:



В одних случаях молекулы образующегося белка напоминают нить, свернутую в клубок (такие молекулы образует, например, белок куриного яйца). В других случаях они сохраняют вытянутую форму (такая молекула напоминает длинную пружинку — рис. 5). Из молекул-пружинок, скрученных друг с другом, как проволочки в кабеле или тросе (рис. 6), слагаются волосы, ногти, мускулы и другие волокнистые ткани нашего организма. Эти молекулы действительно обладают свойством пружины: они могут растягиваться до длины, вдвое превышающей их нормальную, и сжимаются вновь, как только растягивающая сила перестает действовать.

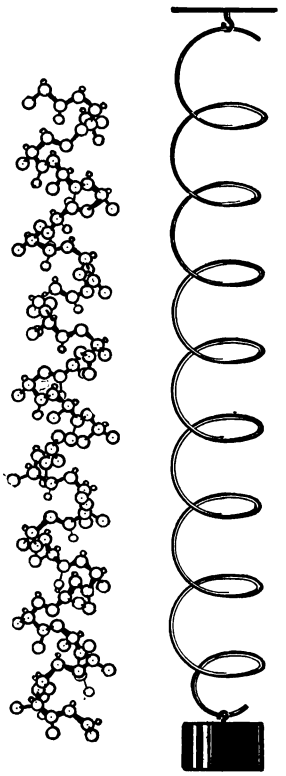


Рис. 5.

Химик вводит расщепленный белок в прибор-автомат и спустя сутки без своего дальнейшего участия получает готовый результат анализа — график, запечатленный на ленте. Он узнает, какие именно аминокислоты и в каком количественном соотношении входили в состав данного белка. Но далее встает сложная задача — превратить данные анализа в структурную формулу. До конца удалось решить ее (с помощью физики и математики — рентгеновского анализа и электронно-счетных машин) для нескольких белков, в том числе для одного из животных белков-гормонов — инсулина. Молекула этого белка состоит из 51 звена, представленного 15 аминокислотами. Его структурная формула едва уместилась бы на странице этого тома. И вот что замечательно: последовательность сцепления аминокислотных звеньев строго одна и та же в инсулине, извлеченном из столь различных животных, как свинья и кит.

Строение молекул инсулина всех свиней и всех китов повторяется и в инсулине лошади, только в нем в одном из звеньев аминокислота серин заменена глицином; у быка замещены другими аминокислотами два аминокислотных звена, у овцы — три... Это единство плана построения молекулы белка, выполняющего одно и то же назначение в организме разных животных, тем более поразительно, что из 15 аминокислот теоретически можно образовать миллиарды миллиардов (больше, чем, например, волос на головах всех жителей Земли) 51-звенных цепей различного строения, беря одинаковые или различные звенья и смыкая их друг с дру-

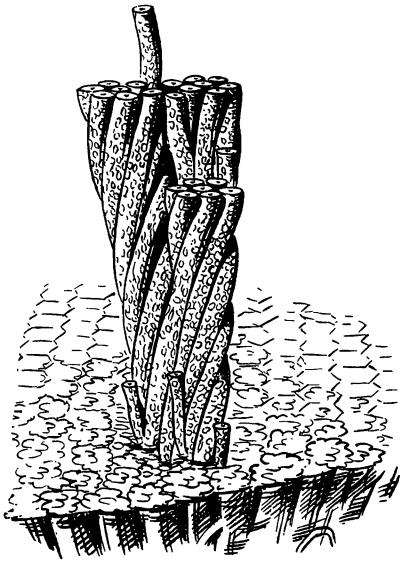


Рис. 6.

гом в разном порядке. На рисунке 7 представлена последовательность сцепления аминокислот в молекуле еще более сложного белка — рибонуклеазы; аминокислоты обозначены здесь начальными буквами их названий: сер — серин, вал — валин и т. д.

Проблема искусственного белка продолжает штурмоваться в разных направлениях. Но и сейчас химия далека от решения задачи получения белков заводским путем. Таким образом, нельзя особенно надеяться на коренное преобразование в ближайшем будущем современных способов питания. Успехи в искусственном воспроизведении природных белков в какой-то мере приближают нас к решению величайшей теоретической и практической задачи — искусственному созданию жизни.

При искусственном воспроизведении белков не обошлось без разочарований. Многие рассчитывали, что создать белок — это и значит создать жизнь. Однако выделено большое количество белков, все они прекрасно сохраняются в пробирках, многие — в виде превосходных кристаллов, но признаков жизни вне живого организма в них так же мало, как в сахаре или крахмале. Это нисколько не поколебало уверенность, что уяснить и осуществить переход от «неживого» к «живому» — цель, доступная именно химическому исследованию.

Химик обращается к биологу с вопросом: какими свойствами нужно наделить молекулу, чтобы она стала «жить»? Тогда уже дело химика думать, какие сочетания атомов для появления этих свойств следует создать.

Многие полагают, что жизнь имеет нехимическое начало, что она началась не с молекулы, а с какого-то уже достаточно сложного сочетания молекул, так как всякий живой организм обладает не только определенным химическим составом, но и определенной организацией. Подробное обсуждение этих мнений будет иметь смысл лишь тогда, когда мы точно определим, что именно разумеем под словом «жить».

Для того чтобы решить, что рассматриваемый объект именно живое существо, мы должны установить у него одновременное наличие ряда свойств. Вопрос и заключается в том, можно ли все эти свойства сочетать в одной молекуле. Создавая краски, химик именно так и сочетает в одной молекуле свойство быть окрашенной, свойство сцепляться с волокном и т. д.

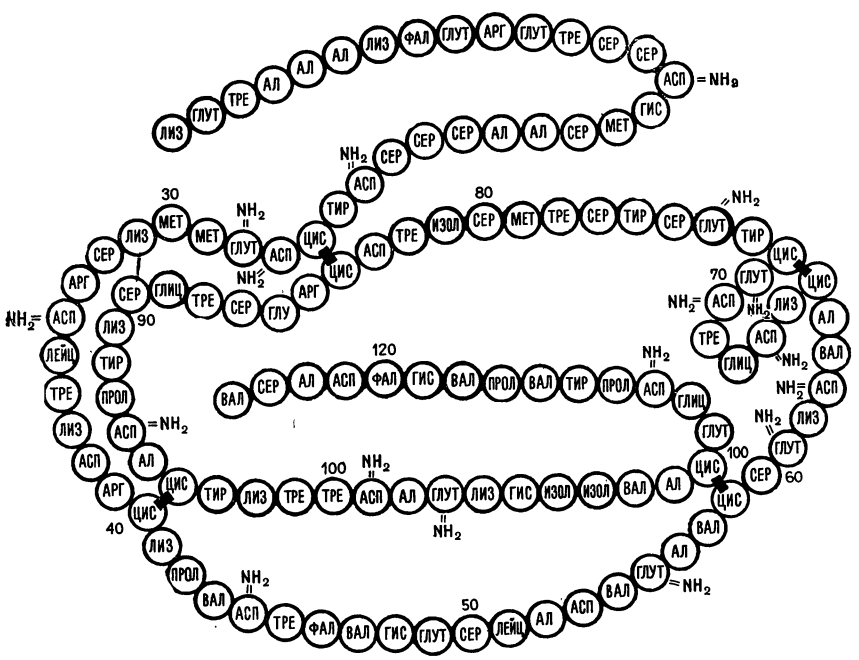



Рис. 7. Последовательность сцепления аминокислот в молекуле белка — рибонуклеазы. Мостики между отдельными участками цепи образуют остатки аминокислот. *Лиз* — лизин, *глут* — глутаминовая кислота, *тре* — треонин, *ал* — аланин, *фал* — фенилаланин, *арг* — аргинин, *сер* — серин, *гис* — гистидин, *мет* — метионин, *тир* — тирозин, *цис* — цистин, *асп* — аспарагиновая кислота, *лейц* — лейцин, *прол* — пролин, *вал* — валин, *глиц* — глицин, *изол* — изолейцин.

Ставя таким образом задачу искусственного создания жизни, мы не рассчитываем, как алхимики, что из химической колбы выскочит готовый гомункулус — маленький живой человечек. Ведь живые существа, помимо всего прочего, имеют за собой миллионы лет истории, управляемой законами естественного отбора, и мы вряд ли сможем перепрыгнуть через эту великую пропасть времени. Мы можем рассчитывать лишь создать нечто такое, что, будучи предоставлено самому себе, при благоприятных условиях превратилось бы спустя миллионы лет в растения, животные или нечто подобное тем и другим.

Будет ли это искусственно созданное «нечто» веществом или каким-то сверхпростым организмом? В течение многих лет пристальное внимание ученых приковано к миру живых существ, недоступных даже сильнейшим микроскопам. Таков бактериофаг — «пожиратель бактерий». Действие бактериофага впервые описал русский ученый Н. Ф. Гамалея еще в 1898 г. Это такой же паразит по отношению к бактериям, как бактерия по отношению к человеку. Бактериофаги присутствуют всюду, где присутствуют бактерии: в животных организмах, в воде рек, озер, морей и т. д. Они выделены и из продуктов, не зараженных бактериями: из чеснока, лука, яблок, моркови. Бактериофаги удалось наблюдать лишь с помощью ультрамикроскопа и электронного микроскопа. Это инструменты такой мощной разрешающей силы, что им уже доступны наиболее крупные молекулы. Итак, бактериофаги имеют размеры массивных молекул! Это материя, раздробленная на молекулы. Но эта материя живет, т. е. питается и размножается, сохраняя свои прирожденные свойства. Вокруг бактериофагов разгорелся страстный спор. По мнению одних, бактериофаг — это вещество, по мнению других — живое существо. Не есть ли он и то и другое одновременно, думали третьи.

Бактериофагам во всем, кроме условий существования, подобны вирусы — ультрамикроскопические возбудители заразных болезней, таких, как грипп, полиомиелит, бешенство. Первый вирус — возбудитель чумы у рогатого скота — был открыт тем же русским ученым Гамалея за два года до открытия им первого бактериофага. Частицы одних вирусов выглядят в электронном микроскопе, как шарики, других — как тонкие и длинные палочки. По отношению к людям, животным и растениям вирусы ведут себя, как микробы. Живые организмы в свою очередь относятся к ним, как к микробам: в борьбе с вирусами они вырабатывают в себе

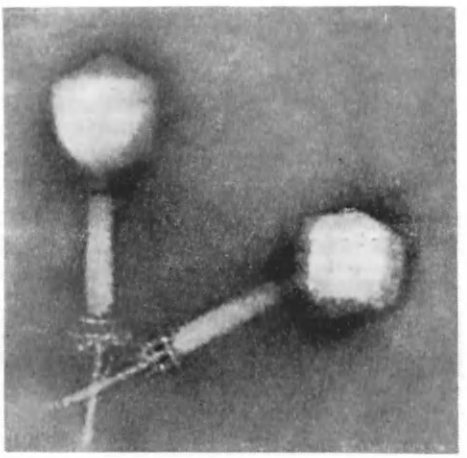


Рис. 8. Бактериофаги под электронным микроскопом.

«антитела», гибельные для данного вида вируса, и в таких случаях, перенеся болезнь, приобретают иммунитет к нему, т. е. повторно этому заболеванию не подвергаются.

Естественно, что врачи обращаются с вирусами так же, как с микробами. А химики обращаются с теми же вирусами, как с самыми обыкновенными веществами: они растворяют их, адсорбируют, осаждают и кристаллизуют.

## ХИМИЯ И НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ

Самое удивительное в развитии живых существ заключается, конечно, в том, что из ничтожного микроскопического зернышка, клубка хромосом, развивается нечто очень большое, очень сложное, очень тонко организованное и настолько точно предопределенное, что близнецы, развившиеся из одной и той же клетки, часто оказываются неразличимо похожими друг на друга. Мы называем это наследственностью. Казалось бы, химику в обсуждении вопросов наследственности делать нечего. Но это не так.

Чтобы последующее не показалось слишком необыкновенным, вспомним, какое богатство образов, мыслей, чувств порождает в нас литературное произведение с помощью всего 33 значков — 33 букв русского алфавита, расставленных в строго определенном порядке и множество раз повторяющихся. Но и 33 значка — это роскошь. Любой текст может быть передан телеграфистом всего с помощью трех знаков азбуки Морзе: точка, тире и пауза.

Однако речь у нас пойдет не о литературных произведениях, а об основном свойстве живых

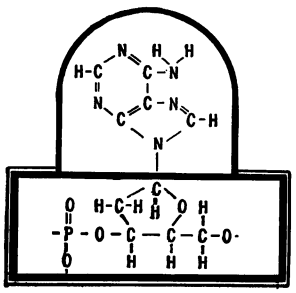


Рис. 9. ДНК — линейный биополимер. Она слагается из нуклеотидов, структура одного из них представлена на этом рисунке.

существ — их способности воспроизводить поколение за поколением себе подобные новые живые существа. Главную роль в передаче наследственных признаков у всех живущих существ, начиная с бактериофага, выполняет определенное вещество. Оно называется дезоксирибонуклеиновой кислотой или сокращенно ДНК. ДНК является линейным биополимером, она слагается из отдельных кирпичиков, так называемых нуклеотидов, как молекула белка из аминокислот. Но аминокислот 20, а нуклеотидов всего 4. Структура одного из них представлена на рисунке 9. Заключенная в рамку часть — общая для всех четырех нуклеотидов, а придаток, изображенный в виде язычка, у них разный. Эти придатки называются соответственно аденином, гуанином, тимином и цитозином. В последующем мы будем обозначать их первыми буквами: А, Г, Т и Ц.

ДНК, свойственные каждому виду бактерий, растений или животных, отличаются от ДНК любого другого вида числом составляющих их нуклеотидов и порядком их сочетания

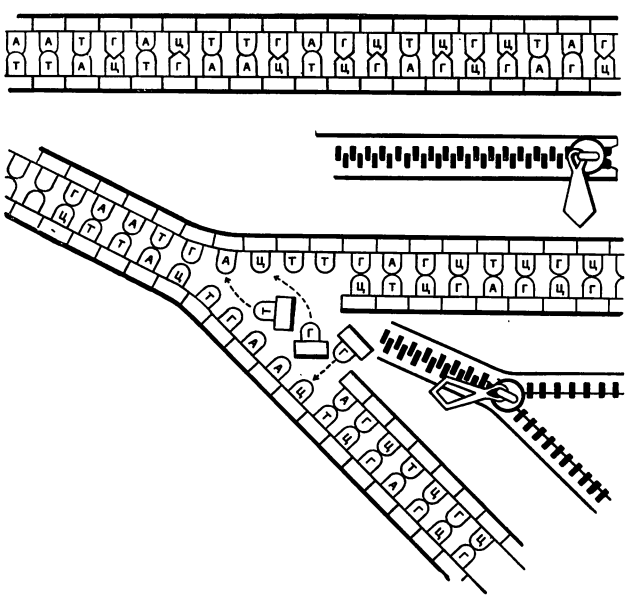


Рис. 10. *Вверху* — сочетание нуклеотидов в молекуле ДНК: две параллельные цепи, соединенные мостиками между нуклеотидами А, Г, Т и Ц. *Внизу* показано размножение молекулы ДНК.

друг с другом совершенно так же, как отличаются друг от друга различные белки. Верхняя часть рисунка 10 показывает, как сочетаются нуклеотиды в молекуле ДНК в две параллельные цепи, связанные одна с другой через придатки А, Г, Т и Ц. Обратите внимание на то, что Т связывается только с А, Ц только с Г! Поэтому последовательность нуклеотидов в одной цепи определяет и размещение нуклеотидов в другой.

Подобно цельному живому организму, ДНК, содержащиеся в его клетках, способны к самовоспроизведению. Как происходит размножение молекул ДНК, показано в нижней части того же рисунка. Начинается с того, что цепочки расходятся, расцепляются. Затем к каждой из них начинают пристраиваться свободные молекулы нуклеотидов, содержащиеся в окружающей среде, следуя строго тому же закону: Т пристраивается к А (или наоборот) и Ц к Г. В результате из одной молекулы ДНК образуются две, совершенно тождественные с исходной молекулой.

Размножение ДНК воспроизведено в пробирках, вне живого организма, как обыкновенная химическая реакция. Для этого достаточно ввести ДНК, выделенную из какого-либо организма, в среду, содержащую все четыре необходимых нуклеотида (обязательно все четыре, иначе реакция не пойдет) и особый фермент — полимеразу, которая «сшивает» пристраивающиеся молекулы нуклеотидов в новую цепочку. Для успеха опыта необходимо лишь предварительно расщепить исходные молекулы очищенной ДНК на две отдельные цепочки. Это достигается простым нагреванием ДНК в течение 10 минут.

Так же происходит «размножение» ДНК в живых организмах, например при заражении бактерии бактериофагом. Бактериофаг представляет собой свернутую в виде спирали молекулу ДНК, наполовину заключенную в белковый чехольчик. При заражении бактерии соответствующим бактериофагом (например, дизентерийной бактерии антидизентерийным бактериофагом) ДНК бактериофага внедряется в бактерию, а белковый чехольчик остается снаружи. В теле бактерии появляется новый «хозяин» — чужеродная ДНК — и начинается тот же самый процесс, который только что был описан как пробирочная реакция. В результате бактерия погибает, и из нее выходит новое поколение бактериофагов — в точности таких же молекул ДНК, заключенных в такие же белковые чехольчики. Нечто подобное происходит с вирусами.

В ДНК, в их нуклеотидном составе и в последовательности нуклеотидов заключена программа развития будущего организма — будь то бактериофаг, вирус или высокоорганизованное существо — человек. Но это значит, что состав и строение исходной молекулы ДНК определяет, контролирует аминокислотный состав и строение молекул тех белков, которым предстоит образовываться в процессе развития данного организма (подобно тому, как последовательность точек и черточек на ленте, выходящей из телеграфного аппарата, определяет последовательность букв в расшифрованном тексте телеграммы). Так оно и есть.

Было синтезировано простейшее вещество, подобное ДНК,— полиуридиловая кислота. Ее цепочка слагается из однотипных звеньев— лишь из одного из четырех нуклеотидов. При ее участии в пробирке был синтезирован «белок». Оказалось, что и «белок» состоит из однотипных звеньев: лишь из одной аминокислоты — фенилаланина. Затем в полиуридиловую кислоту был «вставлен» второй нуклеотид — аденин, и в «белке» появилась новая аминокислота — изолейцин. Но нуклеотидов всего четыре, а аминокислот 20. Как же структура молекулы ДНК может предопределять, контролировать структуру белка, построенного из большего числа аминокислот, чем четыре? Вот здесь нам и приходит на помощь азбука Морзе. Депеша, которая выходит из телеграфного аппарата, состоит только из значков троякого вида: точек, черточек и пауз (если считать паузу за особый значок), а расшифрованный текст — из 33 букв алфавита, причем каждая буква в нем занимает столь же строго определенное место, как каждая точка или черточка в телеграфной депеше. Очевидно, нечто подобное имеет место и в молекулах биополимеров. Каждой аминокислоте отвечает не отдельный нуклеотид, а сочетание (как сейчас предполагается) из трех нуклеотидов; не отдельное нуклеотидное звено молекулы ДНК, а участок из трех таких звеньев, как каждой букве в азбуке Морзе отвечает не отдельный знак — точка или черточка, а комбинация из нескольких точек и черточек.

Химическая теория наследственности открыла пути в создании новых видов — мутаций — живых организмов через перестройку ДНК существующих видов, воздействуя на них химическими реактивами, получившими название мутагенов («рождающих мутации»).

Первые опыты в этом направлении уже принесли обнадеживающие результаты. Открыты, в частности, вещества, которые вызывают увеличение числа хромосом, т. е. пучков нуклеиновых кислот в растительных клетках. Так, из обычных сортов свеклы создана сахарная свекла, превосходящая по урожайности и содержанию сахара лучшие сорта, ранее выведенные биологами. Весьма эффективным вмешательством в структуру ДНК оказалось радиоактивное облучение. Оно вызывает перестройку молекул ДНК, наследственно передаваемую потомству облученных организмов. Отбирая растения, которые обладают полезными качествами, получают новые сорта, более продуктивные, невосприимчивые к вирусам и другим заболеваниям, с неполегающим стеблем.

## МЕДИЦИНА НА МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЕ

Мы изучаем жизненный процесс, разлагая, расчленяя его на массу отдельных закономерностей, причины которых до поры до времени остаются невыясненными. Но это нисколько не мешает нам использовать замеченные закономерности на практике. С другой стороны, раз закономерность установлена, объяснение ее становится лишь вопросом времени. Мы знаем, например, какие службы в нашем организме несет кровь; умеем определять ее достоинства и недостатки с помощью анализа; знаем, как сложно ее поведение в организме, как сложен ее состав, и обнаруживаем строгие закономерности там, где раньше видели дело случая.

Образное выражение «в их жилах течет одинаковая кровь» получило научный смысл. Действительно, кровь может быть одинаковой и разной. Смешав каплю крови своей и своего друга, как это делали наши предки, клянясь друг другу в вечной дружбе, вы под микроскопом увидите либо слипшиеся друг с другом кровяные шарики, либо не увидите ничего особенного. Картина слипания кровяных шариков на языке медицины называется агглютинацией, а на языке химии — коагуляцией.

Эта картина далеко не безобидна. Она раньше приводила к смертельному исходу при неудачных переливаниях крови. Поэтому при ответственной операции врач должен при помощи физико-химического исследования крови определить, к какой из четырех «кровяных групп» принадлежит кровь его пациента и лица, у которого берут кровь.

Как любой орган, кровь подвержена заболеваниям. Одно из них, почти всегда смер-

тельное, под микроскопом проявляется в том, что кровяные шарики утрачивают округлые очертания и принимают форму серпа. Из заболевших кровяных шариков был извлечен белок, осуществляющий функцию дыхания,— гемоглобин и исследовано строение его молекул. И что же обнаружилось? В «больном» гемоглобине одна из аминокислот оказалась в отдельных звеньях замещена другой — глютаминовая кислота валином. Глютаминовая кислота имеет электрический заряд, и это препятствует слипанию молекул гемоглобина, а валин лишен электрического заряда. Вследствие этого молекулы «больного» гемоглобина слипаются друг с другом, что и придает кровяным шарикам серповидную форму.

С точки зрения химика, живой организм — это крепость, построенная из белков, ДНК и т. д. Когда в эту крепость вторгаются и начинают хозяйничать в ней микробы или вирусы—это вторгаются чужеродные белки и нуклеиновые кислоты, наступает инфекционное заболевание. Но, как мы только что видели, заболевание может наступить из-за перерождения собственных белков и ДНК организма — нарушения нормального состава и строения вырабатываемых организмом белков.

С этих позиций рациональная химиотерапия около двух десятков лет назад вступила в борьбу с самой таинственной и зловещей болезнью — раком. Вместо нормального «строительного» материала для ДНК в раковую клетку вторгаются молекулы нуклеотида, испорченные прикреплением к ним того или иного токсофора. Испорченный материал вовлекается в процессы, идущие в раковой клетке, и это отравляет, губит ее.

## ХИМИЯ НА СЛУЖБЕ ВОЙНЫ И МИРА

Многие века люди ставили себе горчичники, чихали от нюхательного табака, желая при этом друг другу здоровья, приправляли свои кушанья перцем, луком и чесноком, не подозревая, что действующие начала этих растений будут извлечены и сконцентрированы также для целей войны. Но интерес к нарывным, чихательным и слезоточивым отравляющим веществам растительного происхождения как к средствам химической войны прошел так же быстро, как появился: они были заменены продуктами химической индустрии, сходными по химическому строению, более дешевыми и сильными по действию. Сравните строение молекулы действующего начала чеснока со строением молекулы «короля» отравляющих веществ — иприта (рис. 11). И там и здесь имеет решающее значение часть молекулы, заключенная между пунктирными линиями, так называемый мустаргил.

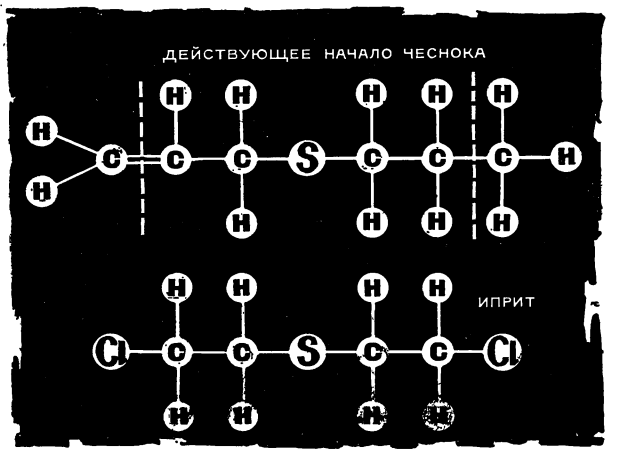



Рис. 11.

Это новое участие химии в массовом истреблении людей удалось преодолеть. Было подписано международное соглашение, запрещающее применять отравляющие вещества (под ним не хватало лишь одной подписи — американского представителя). Но неожиданно исследование отравляющего действия иприта открыло новые пути в химиотерапии злокачественных опухолей. Иприт подавляет деятельность кровотворных органов, чрезмерное усиление которой приводит к переполнению крови лейкоцитами — к белокровию. Но иприт не удовлетворяет основному требованию химиотерапии: щадить здоровую, живую ткань. При замене атома серы в иприте атомом азота получается эмбихин — лекарство, помогающее при хроническом белокровии, а также при злокачественных заболеваниях лимфатических желез.

Когда в борьбу с раком вступила химия, возникла идея присоединить азотно-ипритную группировку атомов к кирпичикам — аминокислотам и нуклеотидам, из которых строятся белки и ДНК, и тем самым как бы отравить их. Были созданы новые средства борьбы со злокачественными опухолями — допан и сарколизин («растворитель опухолей»). Таково обещающее начало: не следует забывать, что химия включилась в борьбу против рака каких-нибудь два десятка лет назад.

Еще вчера утверждали, что наука бессильна в борьбе с теми глубочайшими расстройствами

«химического хозяйства» организма, которые вызывают радиоактивные излучения (а с этой угрозой придется вплотную встретиться при длительных космических путешествиях). Но при этом в расчет не была принята химия. Сначала ощупью, затем, опираясь на первые успехи и раскрывая связь между строением молекул и их антирадиационным действием, через рациональный синтез химики нашли пути к предупреждению и лечению и этого страшного недуга — лучевой болезни.

Итак, искусственные белки, сахар и шелк из дерева, тончайшие ароматические вещества из отвратительно пахнущих продуктов распада и разложения, бесчисленные краски и лекарства из каменноугольной грязи, добротные ткани из природных газов — все это не мечта и не сказка. Это явь XX в., результат неустанного изучения строения молекул. Химия представляется нам волшебным деревом с необычайно разнообразными плодами, но питающимися одними и теми же соками. Направить эти соки в ту или другую ветвь зависит от людей. От них зависит, будет ли химия врачевать или умерщвлять, улучшать пищевые продукты или фальсифицировать их, удобрять почву или уничтожать урожаи напалмом, красить материи, двигать суда, прокладывать туннели... Химия — это океан неисчерпанных и неисчерпаемых возможностей.

■

# ХИМИЯ ПИЩИ

Замечательная лаборатория — кухня! Сколько чудесных химических превращений совершается в ней!

Вы хотели налить себе стакан молока, но, оставленное в теплом месте, оно скисло, и вы съедаете уже простоквашу. Вы с наслаждением вдыхаете аромат свежеиспеченного хлеба, покрытого аппетитной корочкой. Но ведь хлеб — это уже совсем не то, что мука, из которой он был испечен. Вы хотели поджарить яичницу, но зазевались, и яичница на сковородке подгорела. А вот варится суп. Мясо в нем потеряло прежнюю окраску, оно стало серым и легко распадается на отдельные волоконца.

Пока человек не умел добывать огонь, он пользовался растительной и животной пищей в том виде, в каком находил ее в природе,— питался сырым мясом и сырыми плодами. А теперь едва ли кто-нибудь возьмется перечислить все кушанья, какие умеют готовить люди.

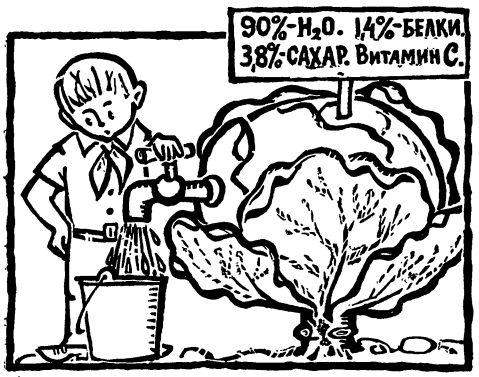
Из каких же веществ состоит все это богатство современной кулинарии? Что происходит с пищей при ее приготовлении, а затем и в нашем организме?

Человеку для питания нужны прежде всего три вида веществ — у г л е в о д ы, ж и р ы и б е л к и. Продукты питания и состоят из этих веществ. Сало и масло — это жиры; в картофеле, овощах и хлебе много углеводов; мясо, рыба, яйца богаты белками.

Всякий знает, что, кроме этих веществ, человеку нужны еще в о д а и с о л и. И то и другое также содержится в нашей пище. Например, в каждых 100 *г* капусты — 90 *г* воды. Но, кроме того, воду человек употребляет и отдельно, а соль добавляет в пищу. Известно также , что наш организм нуждается еще в микроскопических количествах так называемых в и т а м и н о в (см. т. 4 ДЭ, ст. «Витамины»).

Поговорим же о главных составных частях нашей пищи — об углеводах, жирах и белках.

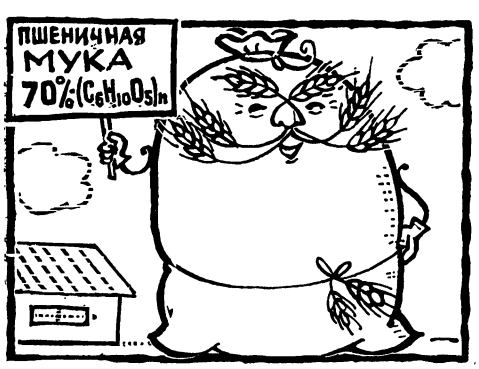
Начнем с ... киселя! Чтобы его сварить, нужен крахмал. Это белое мучнистое вещество называют иногда картофельной мукой. Крахмал разбалтывают в воде и выливают, помешивая, в горячий фруктовый сироп, который сразу начинает густеть. Вот этот крахмал и есть главный представитель углеводов, необходимых нашему организму.




«Как же это может быть,— спросите вы недоуменно,— ведь кисель мы едим сравнительно редко, а углеводы нужны организму постоянно?» Крахмал мы употребляем обычно не в чистом виде, а в составе различных продуктов. Его много в растительной пище — в клубнях и корнях, плодах и зернах. Каждые 100 *г* картофеля доставляют организму около 20 *г* крахмала, 100 *г* пшеничной муки — около 70 *г* крахмала.

Чтобы убедиться в том, что крахмал в этих продуктах есть, проделаем опыт. Изотрите на терке две-три хорошо промытые картофелины. Затем заверните картофель в реденькую тряпочку и разминайте пальцами в воде до тех пор, пока не перестанет образовываться муть. Воде дайте отстояться. Вы заметите на дне кастрюли белый осадок. Слейте с него воду. Это и есть крахмал.

Йодную настойку разбавьте водой и капните этим раствором в сваренный вами крахмальный клейстер. Жидкость сразу же окрасится в ярко-синий цвет. Разбавьте клейстер в 10—20 раз водой. Он и после этого от йода посинеет. Давайте теперь искать крахмал с помощью йодной настойки в различных продуктах.




Капните раствор на свежий срез картофеля, на кусочек вареного картофеля, на срез неспелого яблока, на ломтик белого хлеба и даже на пудру. Всюду, оказывается, есть крахмал. Но синевы не получится, если капнуть йодным раствором на ломтик сала, кусочек мяса, на поваренную соль или на щепочку.

К р а х м а л — сложное вещество, он состоит из трех видов атомов: углерода, водорода и кислорода. Вы уже вспомнили, что из этих трех видов атомов состоит и клетчатка. Сходство по составу крахмала и клетчатки прямо-таки разительное! У них даже одна и та же формула $(C_6H_{10}O_5)_n$, и в молекуле крахмала, как и в молекуле клетчатки, таких групп — $C_6H_{10}O_5$—тысячи. Почему же крахмал и клетчатка разные вещества? Причина в том, что звенья $C_6H_{10}O_5$ в молекуле клетчатки соединены в одну длинную цепь, а в молекуле крахмала разветвлены. Поэтому крахмал не образует волокон, а клетчатка не служит продуктом питания.

В природе крахмал находится в виде зерен в растительных клетках. Зерна эти можно видеть под микроскопом. Каждое из них — это скопление громадного числа молекул. Когда вы терли картофель, то разрывали оболочки клеток, зерна освобождались, отмывались и осаждались на дно.

Заметили ли вы, что на срезе клубня картофеля окраска йода появляется не сразу? Это потому, что зерна крахмала там защищены оболочкой. А в вареном картофеле клетки набухают от воды, оболочки лопаются и йод беспрепятственно попадает к крахмалу.

В поисках крахмала капнем, кстати, йодом себе на руку. Да зачем капать? Мы и так знаем, что от йода наша кожа не синеет. Сколько крахмала мы поедаем в виде хлеба, картофеля, овощей, но в составе наших тканей его нет. Что же происходит с молекулой крахмала, когда она с пищей попадает в наш организм?

Как аппетитно выглядит жареный картофель! При одном его виде, особенно если вы проголодались, «текут слюнки». И они текут недаром: для них сейчас найдется дело.

При пережевывании во рту пища обильно смачивается слюной. В ней есть особое вещество — фермент а м и л а з а. Большие молекулы крахмала могут разлагаться молекулами воды на более мелкие части, а амилаза помогает им в этом.

Разложение молекул крахмала на все более и более мелкие части продолжается и дальше — в желудке и кишечнике (под влиянием других ферментов), пока он в конце концов не пре-

вратится в глюкозу $C_6H_{12}O_6$. Ее много в винограде, она и придает ему сладкий вкус. Поэтому глюкозу часто называют виноградным сахаром.

Наш организм крахмал непосредственно не усваивает, так как его крупные молекулы не могут всасываться в кровь через стенки кишечника. Маленькие же, растворимые в воде молекулы глюкозы легко проникают в кровеносные сосуды и доставляются током крови ко всем тканям организма. Там глюкоза окисляется поступающим с кровью кислородом и превращается в углекислый газ и воду. При этом выделяется теплота. Она дает организму жизненную энергию и поддерживает определенную температуру тела. Значит, крахмал — это как бы топливо нашего организма. Теперь понятно, почему слабому больному для укрепления сил врачи прописывают глюкозу.

Замечательное явление! Если крахмал полностью превращается в глюкозу, то глюкозы получается больше, чем было крахмала. Каждое звено $C_6H_{10}O_5$ превращается в молекулу глюкозы $C_6H_{12}O_6$. Сравните эти формулы. Между ними разница на молекулу воды $H_2O$. Превращение крахмала в глюкозу к тому и сводится, что к каждому звену $C_6H_{10}O_5$ присоединяется молекула $H_2O$. Эту реакцию изображают так:

$$\underset{\text{крахмал}}{(C_6H_{10}O_5)_n} + \underset{\text{вода}}{nH_2O} = \underset{\text{глюкоза}}{nC_6H_{12}O_6}$$

Разложение вещества водой называется гидролизом. При гидролизе крахмала, прежде чем появится глюкоза, образуется много промежуточных веществ, молекулы которых мельче молекул крахмала, но еще крупнее молекул глюкозы. Это так называемые декстрины.

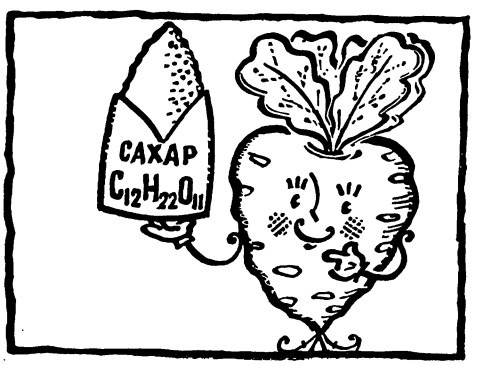
Почему не едят сырую картошку, а предварительно варят или жарят ее? Почему не питаются непосредственно мукой, а пекут из нее хлеб? Да потому, что при варке, жарении и печении крахмал уже начинает подвергаться гидролизу — из него образуются декстрины. А в нашем организме они быстрее и легче превращаются в глюкозу, чем сам крахмал.

Декстрины клейки. Из них образуется твердая корочка на жареном картофеле или печеном хлебе. Их появлением объясняется и клейкость крахмального клейстера. Накрахмаленный воротничок под горячим утюгом становится твердым потому, что крахмал превращается в декстрины.

Вернемся снова к нашей «химической лаборатории» — домашней кухне. Чтобы испечь хлеб или пирог, муку смешивают с водой, добавляют дрожжи и сильно месят. После этого тесто ставят в теплое место и дают ему «подойти». Понаблюдайте за ним в это время. Тесто понемногу поднимается, на нем лопаются какие-то пузырьки. Поднесите к тесту горящую спичку. Она гаснет, как в углекислом газе. Да это и есть углекислый газ. В тесте под влиянием фермента дрожжей идет брожение. В нем накапливается углекислый газ, который поднимает тесто и даже выходит наружу. От этого хлеб при печении становится пористым. Такой хлеб лучше переваривается в организме.

Но ведь при брожении образуется спирт. Вы сможете обнаружить и его. Понюхайте поднявшееся и уже перестоявшее тесто: оно пахнет спиртом.

К углеводам, которые идут нам в пищу, кроме крахмала и глюкозы, относится еще сахароза, или свекловичный сахар. Сахар сначала был найден в соке сахарного тростника, и Европа долго не знала его, так как тростник произрастал только в тропических странах. Но вот в XVIII в. сахар был найден в свекле. Казалось бы, чего проще: потереть свеклу, выжать сок, выпарить его — и сахар готов. Но он еще долго не давался в руки химикам. Сколько было неудач, прежде чем начали ра-



ботать заводы по извлечению сахара из сахарной свеклы! Сейчас эти заводы вырабатывают во всех странах миллионы тонн сахара ежегодно.

Сахар не только лакомство, он очень питателен. Молекула его несложна — $C_{12}H_{22}O_{11}$. В организме человека она разлагается на молекулу глюкозы и молекулу фруктозы:

$$\underset{\text{сахароза}}{C_{12}H_{22}O_{11}} + H_2O = \underset{\text{глюкоза}}{C_6H_{12}O_6} + \underset{\text{фруктоза}}{C_6H_{12}O_6}.$$

Глюкоза и фруктоза имеют одинаковые формулы, но отличаются друг от друга строением молекул. Дальнейшие превращения глюкозы в организме нам известны. Такова судьба и фруктозы.

Если вас спросить, что слаще — мед или сахар, вы, вероятно, назовете мед. А знаете, почему он слаще сахара? Мед — это смесь глюкозы и фруктозы, а фруктоза слаще сахара.

Углеводы на наш стол поставляет природа. Зеленый лист растения — вот та замечательная фабрика, которая изготовляет их. На него падает световой луч. За счет световой энергии между водой, поступающей в лист из земли, и углекислым газом, поглощаемым из воздуха, происходит химическая реакция:

$$6CO_2 + 5H_2O = C_6H_{10}O_5 + 6O_2.$$

Образуются крахмал и кислород. Вот куда идет углекислый газ, усваиваемый растениями, и вот откуда берется кислород, выделяемый растением в атмосферу.

Углекислого газа и воды вокруг нас много. Не попытаться ли искусственно приготовить углеводы для нашей пищи? Образование углеводов в листе идет под действием особого катализатора — зеленого хлорофилла, который как бы ловит световой луч и его энергию обращает в химическую. Однако в лаборатории этот синтез так просто не идет. Все же нашему знаменитому химику А. М. Бутлерову удалось (правда, другим путем) искусственно получить сахаристое вещество. Крахмал вне зеленого листа пока не получили, но нет сомнения, что и такую задачу ученые смогут решить. И тогда реакция углекислого газа с водой в лаборатории, а затем и на заводе будет давать углеводы к нашему столу.

Теперь о жирах. Их известно много. Одни из них твердые; это преимущественно жиры животные — баранье и свиное сало, коровье масло. Другие — жидкие; это в основном растительные масла. Они содержатся в семенах конопли, льна, подсолнечника и т. д.

Молекулы жиров, как и молекулы углеводов, состоят из атомов углерода, водорода и кислорода. При гидролизе они распадаются на молекулы глицерина и «жирных кислот». Стеарин, из которого когда-то делали свечи,— это и есть смесь «жирных кислот».

Переваривание жиров в организме начинается лишь при выходе пищи из желудка в тонкие кишки, так как ни слюна, ни желудочный сок на них не действуют. Под действием фермента тонких кишок — липазы — жиры разлагаются водой на глицерин и кислоты, которые и всасываются через стенки кишечника; затем из этих веществ в организме снова образуются жиры. При окислении жиров в тканях выделяется больше теплоты, чем при окислении углеводов. Таким образом, жиры более калорийное «топливо» для нас.

Углеводы и жиры могут частично заменять друг друга в пище. На севере, где скудна растительность и низка температура, человек потребляет преимущественно жирную пищу, а на юге, богатом растительностью, где организму не приходится тратить столько тепла, человек больше питается овощами и фруктами.

Твердые животные жиры в большом количестве используются в мыловарении. Откуда же взять столько жиров? Решить эту задачу помогла химия. Химики превращают жидкие растительные жиры в твердые.

Оказалось, что если в жидком растительном масле размешать мелкий порошок металла никеля, а затем пропускать при нагревании водород, то водород присоединяется к маслу и образуется твердый жир. Никель служит катализатором этой реакции гидрогенизации. Одни сорта гидрогенизированного жира используются в производстве мыла, другие — для получения маргарина. Сейчас мыло все больше готовят из синтетических веществ, и в скором времени жиры уже не будут расходоваться на непищевые цели.

Маргарин готовят, сильно перемешивая смесь животных и гидрогенизированных жиров

с молоком. Для большей полноценности к нему добавляют витамины. Он очень хорошо усваивается организмом и по питательности не уступает обычным жирам.

Белки — очень сложные органические вещества. В состав их молекул, кроме атомов углерода, водорода и кислорода, входят еще атомы азота и других элементов. Так как белки входят в состав всех живых клеток, то мы неизбежно употребляем их в пищу, питаемся ли мы растительной или животной пищей.

Однако главными «поставщиками» белков для нас служат мясо, рыба, яйца, хлеб. Белков в этих продуктах примерно: 21% (в мясе), 18% (в рыбе), 13% (в сухом хлебе).

Белки — это прежде всего «строительный материал» тканей организма. Один ученый сказал, что клеточки организма — это печки, построенные из белка, в которых горят жиры и углеводы. Но и белки тоже подвергаются изменениям в нашем организме. Они как бы «изнашиваются», сгорают и требуют замены. Беспрерывное обновление клеток организма идет за счет белков пищи.

Белки невозможно заменить углеводами или жирами, как те заменяют друг друга. При отсутствии их в пище человек начинает худеть, так как расход их перестает восполняться. При длительном белковом голодании может наступить полное истощение и смерть.

Сложные молекулы белков под действием ферментов — пепсина и трипсина — в пищеварительном тракте подвергаются гидролизу. Получаются более простые вещества — аминокислоты. Они всасываются в кровь, и из них уже организм строит свои собственные белки.

Посмотрим теперь, что же происходит с белками в нашей кухонной лаборатории. Белок яйца на сковороде свернулся, но он, конечно, сохранил свои питательные свойства. Свернувшиеся белки мяса мы наблюдаем в виде хлопьев на поверхности супа. Чтобы суп имел более красивый вид, хозяйки удаляют их. Но следует ли это делать, ведь с белковыми хлопьями суп будет питательней.

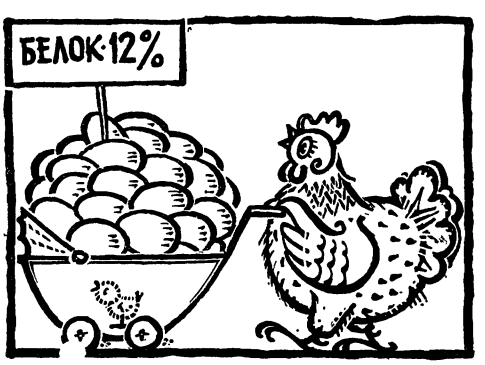
Если дома при варке супа хотят иметь вкусное мясо, посоветуйте опускать его в кипящую, а не в холодную воду. Белки мяса при этом свернутся и закроют выход из мяса в суп другим белкам и вкусовым веществам. Мясо станет вкусным, но бульон будет не особенно приятным. Наоборот, если хотят получить наваристый бульон, то мясо следует опускать в холодную воду. Белки и вкусовые вещества мяса при этом будут переходить в бульон, и суп будет вкусным.

Знание свойств белков объяснит нам еще одно явление. Когда речь шла о выпечке хлеба, не возник ли у вас вопрос: «Почему хлеб остается пористым даже после того, как углекислый газ улетучился из него?»

Возьмите немного муки, заверните в реденькую тряпочку и отмойте крахмал. На тряпочке останется белок — клейковина. Он недаром так назван, вы даже на ощупь можете убедиться в его клейкости. Теперь уже ответ ясен: клейковина образует вокруг пузырьков углекислого газа прочную пленочку, которая остается и после того, как углекислый газ вырвется наружу.

Есть простой способ распознавания белковых веществ по их запаху при горении. Но мы познакомимся с более совершенным химическим способом.

Разбавьте белок куриного яйца водой, добавьте раствор щелочи, затем несколько капель раствора медного купороса и слегка нагрейте. Появляется фиолетовая окраска. Теперь, зная эту реакцию, пускайтесь с нею в исследования по вашей «лаборатории». Прокипятите кусочек мяса или возьмите немного супу и испытайте его при помощи щелочи и медного купороса.



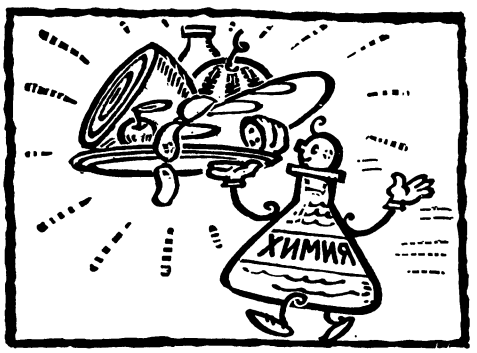
Испытайте клейковину, кусочек рыбы. Покипятите со щелочью шерсть или волосы и проверьте, дадут ли они фиолетовое окрашивание. Или другой способ. Прибавьте к разбавленному водой белку несколько капель концентрированной азотной кислоты, и вы заметите белый постепенно желтеющий осадок. Желтые пятна на руках у тех, кто неаккуратно обращается с азотной кислотой,— результат реакции кислоты с белками кожного покрова.

В заключение нашей экскурсии по домашней лаборатории займемся исследованием молока. Это — замечательное сочетание всех необходимых для питания человека веществ, о которых мы только что говорили. Недаром только одним молоком матери питается начинающий жизнь ребенок. В каждых 100 *г* молока содержится примерно по 4 *г* углеводов и жиров и 5 *г* белков; есть в нем и витамины.

Когда молоко долго стоит, оно покрывается слоем сливок. Это всплывают наверх мельчайшие капельки жира. С виду сливки как будто не похожи на жир. Но если их сбить, то получится сливочное масло. Снимите сливки с молока ложечкой. Добавьте к снятому молоку несколько капель уксуса. На ваших глазах произойдет створаживание молока. Это свертывается белок — к а з е и н. Отделите творожную массу от сыворотки и проделайте с белком ту или иную известную вам цветную реакцию.

Сыворотка представляет собой раствор в воде углевода — м о л о ч н о г о  с а х а р а — и некоторого количества солей. Молочный сахар очень похож на обычный и легко усваивается молодым организмом. Именно молочный сахар, а не крахмал представляет здесь класс углеводов.

Скисание молока часто происходит без добавки уксуса, под действием образующейся в самом молоке кислоты. В воздухе всегда носятся так называемые молочнокислые бактерии. Попадая в молоко, эти бактерии вызывают брожение молочного сахара. При этом образуется м о л о ч н а я  к и с л о т а, под действием которой и свертывается казеин.




Если молоко долго стояло и вы боитесь, что оно может свернуться при кипячении, добавьте в него немножко питьевой соды. Она нейтрализует кислоту, и молоко можно безбоязненно кипятить.

Теперь, когда вы сядете за обед или завтрак, можете о многом поразмыслить. Подумайте, из чего приготовлено каждое ваше блюдо, и представьте себе всю цепь химических превращений потребляемых вами веществ.

■

# БЕСЕДА О САМОМ НЕОБЫКНОВЕННОМ В МИРЕ ВЕЩЕСТВЕ

## ЧТО ТАКОЕ ВОДА?

Такой вопрос может показаться не только странным, но и немного невежливым. Кто же этого может не знать? Всякий знает, что вода — это соединение водорода и кислорода. Вот ее всем известная формула:

$$H_2O$$

С водой очень хорошо знаком каждый, кто привык умываться по утрам, пьет чай, умеет плавать, любит бегать под дождем, не боясь промокнуть, кататься на коньках и ходить на лыжах.

### Сколько существует различных водородов?

В природе существуют **три** различных водорода — три его изотопа. Самый легкий — $H^1$. Химики его часто называют протием. Водород в обычной воде почти нацело состоит из протия. Кроме него, во всякой воде есть тяжелый водород — дейтерий $H^2$, его чаще в химии обозначают символом D. Дейтерия в воде очень мало. На каждые 6700 атомов протия в среднем приходится только один атом дейтерия. Кроме протия и дейтерия, существует еще сверхтяжелый водород $H^3$. Его обычно называют тритием и обозначают символом Т. Тритий радиоактивен, период его полураспада немного больше 12 лет. Он непрерывно образуется в стратосфере под действием космического излучения. Количество трития на нашей Земле исчезающе мало— меньше одного килограмма на всем земном шаре; но, несмотря на это, его можно обнаружить повсюду, в любой капле воды. Физики научились получать тритий искусственно в ядерных реакторах.

Недавно ученые заподозрили, что возможно существование четвертого изотопа водорода — $H^4$ и даже пятого — $H^5$. Они тоже должны быть радиоактивными.

### Сколько на свете кислородов?

В природе найдены три различных изотопа кислорода. Больше всего легкого кислорода $O^{16}$, значительно меньше тяжелого $O^{18}$ и совсем мало кислорода $O^{17}$. В кислороде воздуха, которым мы дышим, на каждые десять атомов $O^{17}$ приходится 55 атомов $O^{18}$ и более 26 000 атомов изотопа кислорода $O^{16}$.

Физики сумели создать в своих ускорителях и реакторах еще четыре радиоактивных изотопа кислорода: $O^{14}$, $O^{15}$, $O^{19}$ и $O^{20}$. Все они живут очень недолго и через несколько минут распадаются.

### Сколько может быть различных вод?

Если подсчитать все возможные различные соединения с общей формулой $H_2O$, то результат покажется неожиданным: всего могут существовать **сорок две** разных воды. Из них **тридцать три** воды будут радиоактивными, но и стабильных, устойчивых вод будет тоже немало — **девять**:

$H_2O^{16}$, $H_2O^{17}$, $H_2O^{18}$, $HDO^{16}$, $HDO^{17}$, $HDO^{18}$, $D_2O^{16}$, $D_2O^{17}$, $D_2O^{18}$.

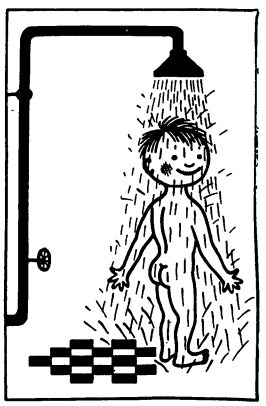
Если же подтвердится сообщение о том, что существуют еще два сверхтяжелых изотопа водорода — $H^4$ и $H^5$, то будут возможны уже **сто пять** различных типов молекул воды.

Подсчитайте сами, сколько различных вод, молекулы которых содержат тритий, могут образовываться на границе с космосом и постепенно вместе с дождями выпадать на землю. Попробуйте сосчитать также, сколько различных радиоактивных вод возникает в воде, охлаждающей атомный реактор.

Где бы в мире ни зачерпнуть стакан воды, в нем всегда окажется смесь различных молекул, неодинаковых по изотопному составу. Конечно, вероятность образования молекул с разным изотопным составом далеко не одинакова. Молекулы, содержащие сразу два или три редко встречающихся изотопных атома, будут возникать так редко и их будет так мало, что, по мнению физиков, их пока можно не принимать во внимание.

### Что же такое обыкновенная вода?

Такой воды в мире нет. Нигде нет обыкновенной воды. Она всегда необыкновенная. Даже по изотопному



С водой хорошо знаком каждый из вас.

составу вода в природе всегда различна. Он зависит от истории воды — от того, что с ней происходило в бесконечном многообразии ее круговорота в природе. При испарении вода обогащается протием, и вода дождя поэтому отлична от воды озера. Вода реки не похожа на морскую воду. В закрытых озерах вода содержит больше дейтерия, чем вода горных ручьев. В каждом источнике свой изотопный состав воды.

Когда зимой замерзает вода в озере, никто из тех, кто катается на коньках, и не подозревает, что изотопный состав льда изменился: в нем уменьшилось содержание тяжелого водорода, но зато повысилось количество тяжелого кислорода. Поэтому вода из растаявшего льда уже другая и отличается от той воды, из которой лед был получен.

Если воду разложить химически и сжечь добытый из нее водород, то получится снова вода, но совсем другая, потому что в воздухе изотопный состав кислорода отличается от среднего изотопного состава кислорода воды. Но зато, в отличие от воды, изотопный состав воздуха один и тот же на всем земном шаре.

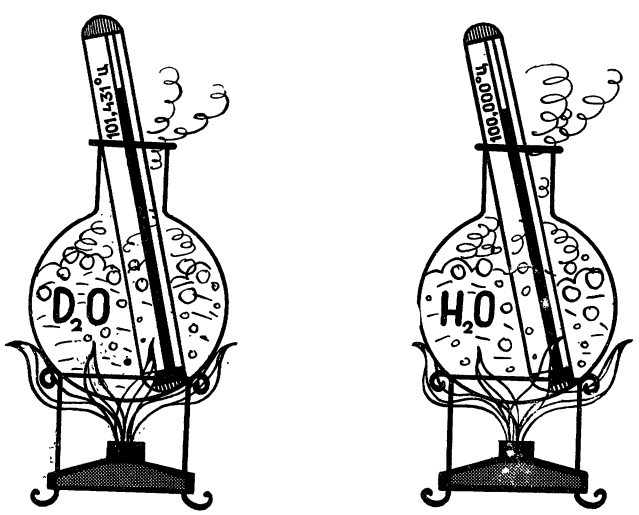
Вода в природе не имеет постоянного изотопного состава, она вечно меняется, и только поэтому нельзя сказать, что где-то есть какая-то обыкновенная вода.

## Что такое легкая вода?

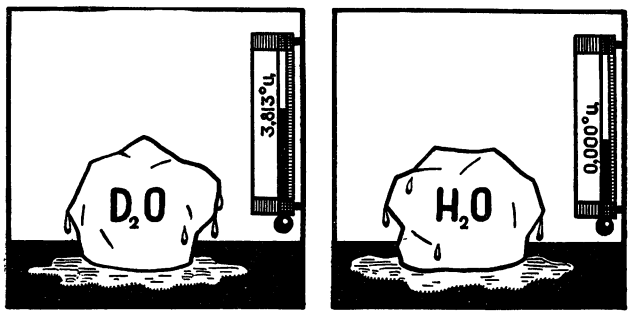
Это та самая вода, формулу которой знают все школьники — $H^1_2O^{16}$. Но такой воды в природе нет. Такую воду с огромным трудом приготовили ученые. Она им понадобилась для точного измерения свойств воды, и в первую очередь для измерения ее плотности. Пока такая вода существует только в нескольких крупнейших лабораториях мира, где изучают свойства различных изотопных соединений.

## Что такое тяжелая вода?

И этой воды в природе нет. Строго говоря, нужно было бы называть тяжелой воду, состоящую только из одних тяжелых изотопов водорода и кислорода — $D_2O^{18}$; но такой воды нет даже и в лабораториях ученых. Пока она еще никому не нужна и незачем ее готовить. Конечно, если эта вода понадобится науке или технике, ученые сумеют найти способ, как ее получить: и дейтерия, и тяжелого кислорода в природной воде сколько угодно.



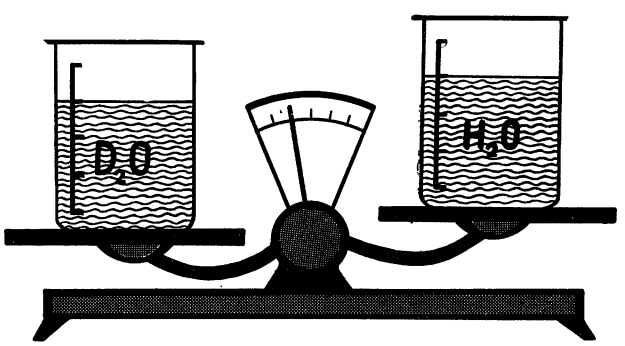

Тяжелая вода кипит при более высокой температуре, чем обычная вода.




...и замерзает при более высокой температуре.

В науке и ядерной технике принято условно называть **тяжелой водой** тяжеловодородную воду. Она содержит только дейтерий, в ней совсем нет обычного легкого изотопа водорода. Изотопный состав по кислороду в этой воде соответствует обычно составу кислорода воздуха.

Еще совсем недавно никто в мире и не подозревал, что такая вода существует, а теперь во многих странах мира работают гигантские заводы, перерабатывающие миллионы тонн воды, чтобы извлечь из нее дейтерий и получить чистую тяжелую воду.




Тяжелая вода потому и тяжелая, что тяжелее обычной. Ее плотность 1,104.

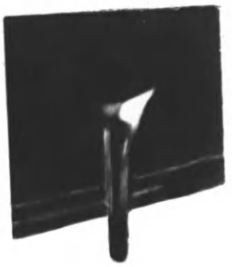
## Бывает ли полутяжелая вода?

Полутяжелой водой можно назвать воду со смешанными молекулами состава HDO. Она есть во всякой природной воде, но получить ее в чистом виде невозможно, потому что в воде всегда протекают реакции изотопного обмена. Атомы изотопов водорода очень подвижны и непрерывно переходят из одной молекулы воды в другую. Приготовить воду, средний состав которой будет соответствовать формуле полутяжелой воды, нетрудно. Но благодаря реакции обмена

$$2HDO \rightleftarrows H_2O + D_2O$$

она будет представлять собой смесь молекул с разным изотопным составом: $H_2O$, HDO, $D_2O$.

1



3

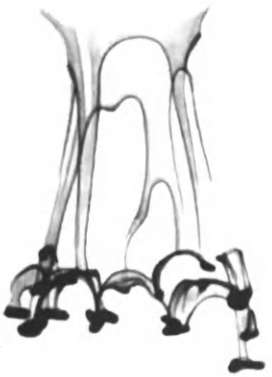
4

2

6

5

## НЕВЕДОМОЕ РЯДОМ



7

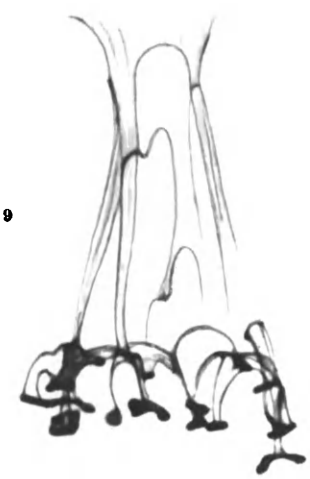
### КАПЛЯ ВОДЫ, УПАВШАЯ В ВОДУ

Это изящное и загадочное явление каждый из вас может увидеть сам. Для этого нужно очень осторожно уронить подкрашенную каплю с высоты 1—2 *см* в прозрачную банку с водой, которая перед опытом простояла несколько часов вдали от источников тепла, и в ней прекратилось конвекционное движение.

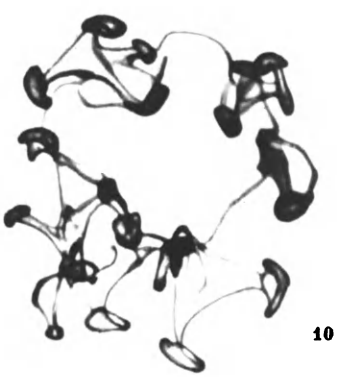
На этих фотографиях, сделанных специально для Детской энциклопедии, показано, что происходит с каплей. Капля (*1*), упав с кончика пипетки в воду, превращается в вихревое кольцо (*2*). Оно расширяется, и в нем возникают утолщения (*3*). Постепенно они развиваются во вторичные вихревые колечки (*4*, *5*, *6*). Процесс повторяется, и число колечек быстро растет (*7*, *8*, *9*, *10*). В такую сложную систему вихревых потоков капля превращается всего за несколько минут.

В правом ряду фотографий процесс снят сверху, в левом — сбоку. Это удивительное явление еще почти неизвестно и неизучено. Может быть, кто-либо из читателей исследует его и откроет законы, которые им управляют? Кто знает, к каким последствиям это приведет в будущем.

8

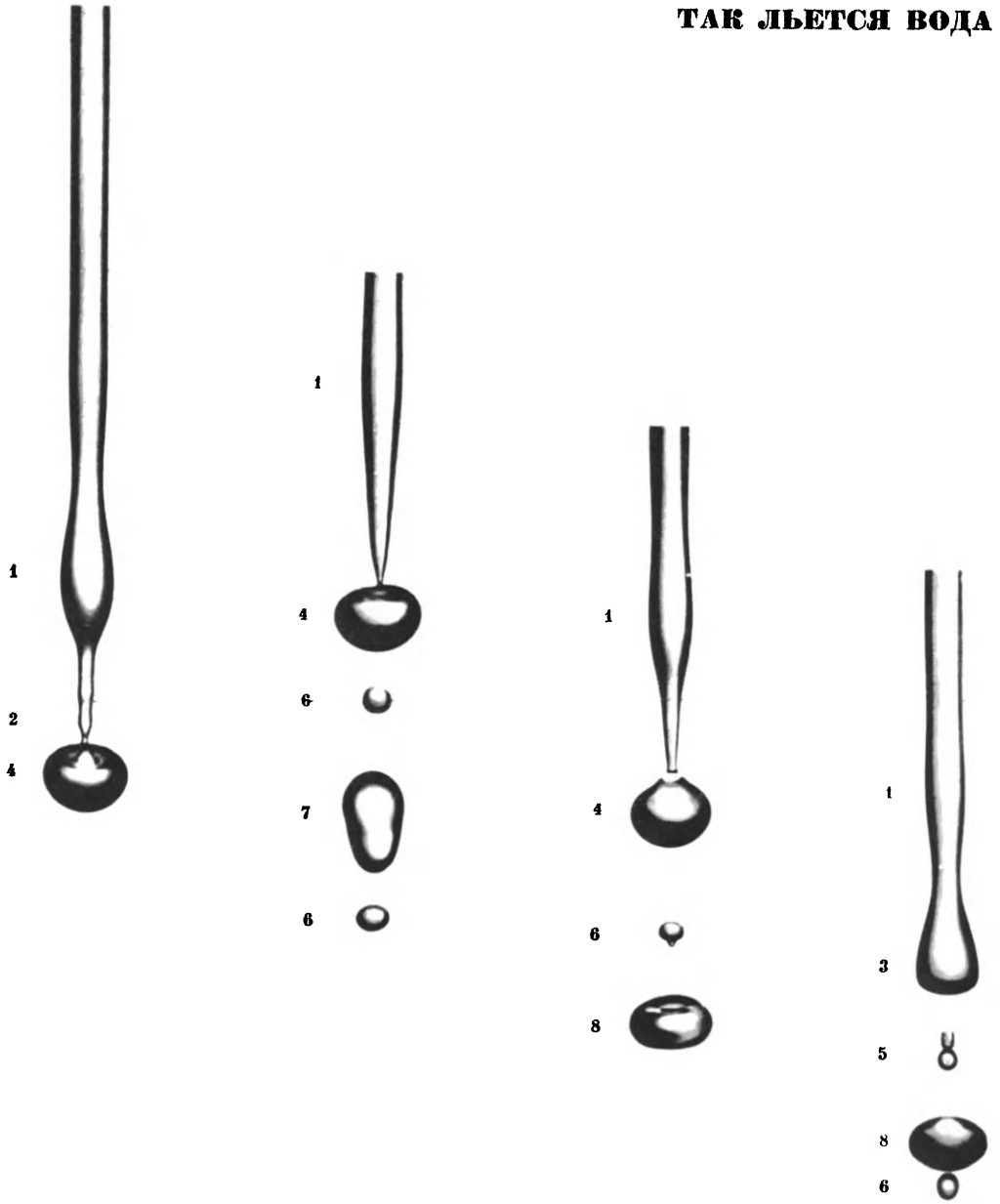


9



10

# ТАК ЛЬЕТСЯ ВОДА




На этих снимках сфотографирован конец очень тонкой водяной струи. На поверхности струйки возникают волнообразные упругие колебания (*1*). Они усиливаются, и образуется тонкая перетяжка (*2*), она разрывается. Утолщение струи (*3*), находившееся перед перетяжкой, превращается в каплю (*4*), а то, что было перетяжкой, оттягивается (*5*) и становится маленькой капелькой (*6*). Она названа «шариком Плато» по имени бельгийского физика. Плато был слепым, но тем не менее он сумел предсказать существование этой капельки задолго до того, как ученые смогли ее рассмотреть.

Под действием поверхностного натяжения капля колеблется. Она то вытягивается (*7*), то, снова расширяясь, сплющивается (*8*). Ее колебания хорошо изучены. Они в свое время помогли физикам разгадать тайну распада атомного ядра.

Распад струи жидкости на капли имеет очень большое значение для техники, поэтому его тщательно изучают. Механизм образования капель влияет на эффективность использования горючего при впрыскивании его в двигатель внутреннего сгорания. Тем самым от распада струи зависит и мощность двигателя.

Снимки сделаны выдержкой в одну миллионную долю секунды. Они увеличены в 10 раз.

## Что такое «нулевая» вода?

Нулевая вода состоит из чистого легкого водорода и кислорода воздуха. Эту воду физико-химики выбрали в качестве эталона: у нее очень постоянный состав. Ее не так уж трудно получать, и с ней удобно сравнивать воду неизвестного состава: определив разницу в плотности, легко найти содержание дейтерия.

## А может быть, есть еще какая-нибудь вода?

Кроме всех перечисленных вод, еще существует тяжелокислородная вода — $H_2O^{18}$. Получать ее из природной воды очень сложно и трудно. До сих пор эту воду в чистом виде еще, пожалуй, никто не сумел приготовить.

Тяжелокислородная вода очень нужна для исследования многих биологических и химических процессов, поэтому довольно концентрированные растворы этой воды в воде обычной получают теперь на заводах.

## А радиоактивная вода существует?

Да. Физики научились получать тритиевую воду искусственным путем в атомных реакторах. Из-за сильной радиоактивности эта вода очень опасна. Пока такая вода нужна только ученым.

## Больше нет никаких вод?

Больше нет. Просто потому, что все остальные возможные воды пока еще никому не нужны. Если понадобятся и они, то, без сомнения, наука найдет способ получать любую из них.

## Много ли разных вод содержится в воде?

В какой воде? В той, что льется из водопроводного крана, куда она пришла из реки, тяжелой воды $D_2O^{16}$ около 150 *г* на тонну, а тяжелокислородной ($H_2O^{17}$ и $H_2O^{18}$ вместе) почти 1800 *г* на тонну воды. А в воде из Тихого океана тяжелой воды почти 165 *г* на тонну.

В тонне льда одного из больших ледников Кавказа тяжелой воды на 7 *г* больше, чем в речной воде, а тяжелокислородной воды столько же. Но зато в воде ручейков, бегущих по этому леднику, $D_2O^{16}$ оказалось меньше на 7 *г*, а $H_2O^{18}$ — на 23 *г* больше, чем в речной.

Тритиевая вода $T_2O^{16}$ выпадает на землю вместе с осадками, но ее очень мало—всего лишь 1 *г* на миллион миллионов тонн дождевой воды. В океанской воде ее еще меньше.

Строго говоря, вода всегда и всюду разная. Даже в снеге, выпадающем в разные дни, разный изотопный состав. Конечно, отличие невелико. Всего 1—2 *г* на тонну. Только, пожалуй, очень трудно сказать — мало это или много.

## В чем же различие между легкой, природной и тяжелой водой?

Ответ на этот вопрос будет зависеть от того, кому он задан. Каждый из нас не сомневается, что с водой-то он знаком хорошо. Если каждому из нас показать три стакана с обычной, тяжелой и легкой водой, то каждый из нас даст совершенно четкий и определенный ответ: во всех трех сосудах простая чистая вода. Она одинаково прозрачна и бесцветна. Ни на вкус, ни на запах нельзя найти между ними никакой разницы. И это будет верно. Это все — вода.

Химик на этот вопрос ответит почти так же: между ними нет **почти** никакой разницы. Все их химические свойства **почти** неразличимы: в каждой из этих вод натрий будет одинаково выделять водород, каждая из них при электролизе будет одинаково разлагаться, все их химические свойства будут почти совпадать. Это и понятно: ведь химический состав у них одинаков. Это вода.

Физик не согласится. Он укажет на заметную разницу в их физических свойствах: и кипят и замерзают они при различных температурах, плотность у них разная, а упругость их пара тоже немного различна. Правда, все эти различия малы. Изменения в изотопном составе очень мало влияют на физические свойства вещества.

Биолог, пожалуй, встанет в тупик и не сразу сумеет найти ответ. Ему нужно будет над вопросом о различии между водой с разным изотопным составом еще немало поработать. Еще совсем недавно все считали, что в тяжелой воде живые существа не могут жить. Ее даже **мертвой** водой называли. Но оказалось, что если очень медленно, осторожно и постепенно заменять протий в воде, где живут некоторые микроорганизмы, на дейтерий, то можно их приучить к тяжелой воде и они будут в ней неплохо жить и развиваться, но обычная вода станет для них вредной.

## Кому же нужна тяжелая вода?

Человечеству! Оно уже стоит у порога, за которым ждет его страшная угроза энергетического голода. И вся надежда связана с тем, что будет решена проблема, как использовать для энергетики тяжелую воду.

## Зачем нужна тяжелая вода теперь?

Все, что мы до сих пор говорили, касалось тех свойств, которые зависят от строения атомов, от их порядкового номера, от числа и расположения электрических зарядов в атомных ядрах и электронов в молекуле. Только это и определяет химическое поведение вещества. Строение молекулы не зависит от массы атомного ядра. Поэтому одинаковые молекулы с разным изотопным составом химически почти неразличимы.

Но сходство в свойствах изотопных соединений прекращается, когда вопрос касается кинетических и ядерных характеристик. Молекула, содержащая тяжелый изотопный атом, при той же температуре движется с меньшей скоростью, при столкновении таких частиц иначе протекает обмен кинетической энергией. А самое главное—это то, что изменяется способность вступать в ядерные превращения.

Вот эти-то свойства резко отличают тяжелую воду от любой другой воды с иным изотопным составом: ведь в ее состав входит тяжелый водород. В наши дни тяжелая вода успешно применяется в атомной энергетике для замедления нейтронов в ядерных реакторах.

Роль замедлителя в атомном котле очень важна. Когда ядро урана-235 распадается на два атомных ядра-осколка, из него одновременно вылетают два или три нейтрона. Скорость их огромна, она превышает 20 000 *км/сек*. Эти быстрые нейтроны не могут сами вызвать новый распад в других атомах урана. Они пролетят мимо них с такой быстротой, что просто не успеют прореагировать. Нейтроны нужно замедлить примерно до 2,2 *км/сек*, так, чтобы они пришли в равновесие с тепловым движением окружающих молекул. При этом энергия нейтронов должна уменьшиться почти в 60 млн. раз. Далеко не всякое вещество пригодно в качестве замедлителя. Выбор очень ограничен. Во-первых, оно не должно поглощать нейтроны, вступая само в ядерные реакции, а во-вторых, оно должно состоять обязательно из легких элементов с малыми массовыми числами. При соударении с тяжелым ядром скорость нейтрона почти не изменяется, точно так же как почти не изменяется скорость мяча, отскакивающего при ударе о стенку.

Самым лучшим замедлителем мог бы быть легкий водород, но он заметно поглощает нейтроны. Тяжелый водород их почти не поглощает. Нейтрону, попавшему в тяжелую воду, достаточно всего 25 раз столкнуться с тяжелым водородом, чтобы потерять свою высокую энергию и приобрести способность взаимодействовать с ураном. Неплохой замедлитель — углерод в форме графита, но нейтрону в нем приходится испытывать около 110 столкновений, чтобы утратить начальную скорость.

Использование тяжелой воды в качестве замедлителя позволяет конструкторам создавать очень эффективные, а главное, легкие и компактные атомные энергетические установки, особенно для их применения на транспорте.

## Зачем еще нужна тяжелая вода?

Чтобы исследовать механизм многих химических, физических и биологических процессов. Это, конечно, скромное, но очень важное применение тяжелой воды. Наверное, нет ни одного природного процесса, в котором не принимала бы участия вода или водород. Атомы тяжелого водорода наиболее важные меченые атомы. Их, как разведчиков в бой, направляют химики в исследуемые реакции, чтобы проследить за ее ходом. В наши дни уже возникла и быстро развивается самостоятельная область науки — химия изотопного обмена. Наиболее важная ее задача — изучать с помощью дейтерия механизм химических реакций при получении органических соединений и исследовать их строение.

## Почему же человечеству будет нужна именно тяжелая вода?

Чтобы ответить на этот вопрос, нельзя обойтись без самого замечательного языка — без языка цифр и формул. Он понятен всем по-настоящему грамотным людям, в какой бы стране они ни жили и на каком бы языке ни разговаривали. Для химиков теперь очень точно измерены массы всех изотопных атомов. Вот некоторые значения этих масс:

| | |
|---|---|
| Протий $_1H^1$ | $M=1{,}007\ 825$ |
| Дейтерий $_1D^2$ | $M=2{,}014\ 102$ |
| Тритий $_1T^3$ | $M=3{,}016\ 049$ |

Физики сумели установить возможность ядерных реакций между легкими атомами, в том числе возможность реакций между атомами дейтерия:

$$_1D^2+{}_1D^2={}_1H^1+{}_1T^3.$$

К такой реакции неприменим закон сохранения веса, каким представляла его старая химия: в результате реакции получается недостача:

$2\cdot 2{,}014\ 102-1{,}007\ 825-3{,}016\ 049=0{,}004\ 330$ *г*.

Это немалая недостача, она означает, что если бы удалось найти условия, при которых может протекать реакция между двумя грамм-атомами тяжелого водорода, то, согласно уравнению Эйнштейна $E=\Delta m\cdot c^2$, можно было бы получить энергию:

$$0{,}00433\cdot(3{,}0\cdot 10^{10})^2=3{,}9\cdot 10^{18}\ эрг=3{,}9\cdot 10^{11}\ дж.$$

Это немалая энергия. В наше время, чтобы получить такую энергию, приходится сжигать в топках котлов ни много ни мало 13,5 *т* первосортного угля. А ведь его еще нужно добыть из шахт и доставить из-под земли к топке.

Между тем в соответствии с уравнением ядерной реакции такую энергию можно получить при затрате всего лишь двух грамм-атомов дейтерия, которые содержатся в одной грамм-молекуле тяжелой воды. А тяжелая вода есть в любой природной воде. Следовательно, простой воды потребуется: $6700\cdot 18=120\ 600$ *г*, или 120 *л*. Значит, из **одного** литра обычной воды можно добыть больше энергии, чем можно получить ее из **ста килограммов** высококачественного угля. А запасы воды на нашей Земле неисчерпаемы.

## Что же мешает получать энергию из воды?

Такая возможность пока что кажется фантастической, но она вполне реальна. На пути к ее осуществлению наука уже преодолела немало трудностей. Уже решена сложнейшая проблема, как извлекать тяжелую воду из природной. Теоретически уже исследованы и рассчитаны условия, при которых возможны ядерные реакции между легкими атомами.

Но, к сожалению, исследователи встретили много трудностей. Насколько они серьезны, может показать прямой расчет: чтобы два атома могли вступить в ядерную реакцию, их ядра должны столкнуться, т. е. сблизиться до расстояния, начиная с которого межъядерные силы уже могут преодолеть электростатическое отталкивание — примерно до $10^{-12}$ *см*.

Но ядра атомов защищены, как броней, своими электронными оболочками. Эти оболочки простираются на расстояние в десятки тысяч раз большее. А самое главное — ядра заряжены и отталкиваются друг от друга, как и все одноименно заряженные тела. Энергию, необходимую для того, чтобы преодолеть их взаимное отталкивание, рассчитать нетрудно. Из закона Кулона следует, что потенциальная энергия двух ядер, сблизившихся на расстояние $10^{-12}$ *см*, должна быть равна:

$$\frac{Z_1\cdot Z_2\,(4{,}8\cdot 10^{-10})^2}{10^{-12}}=2{,}3\cdot 10^{-7}\cdot Z_1\cdot Z_2\ эрг,$$

если между собой сталкиваются элементы с атомными номерами $Z_1$ и $Z_2$.

Конечно, мир атомных величин не очень привычен и нагляден, и трудно сразу представить себе, какова же эта энергия — мала или не очень мала. Но легко сообразить, с какой скоростью должны сталкиваться атомы, чтобы преодолеть потенциальную энергию электростатического отталкивания. Они должны обладать не меньшей кинетической энергией или по крайней мере равной. Следовательно, можно написать:

$$\frac{1}{2} mv^2 = 2{,}3 \cdot 10^{-7} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \text{ эрг},$$

массу одного атома можно найти из атомного веса, зная, сколько атомов содержится в грамм-атоме:

$$m = \frac{A}{6{,}02 \cdot 10^{23}}.$$

Можно найти и скорость, с которой должны столкнуться атомы, чтобы могла начаться ядерная реакция:

$$V = 5{,}3 \cdot 10^8 \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{A}}.$$

У дейтерия атомный номер $Z=1$. Масса изотопа $A=2$, следовательно, скорость атомов должна быть равна: $V=3{,}8 \cdot 10^8$ *см* в секунду, или 3800 *км/сек*. При обычной температуре физикам известна средняя скорость теплового движения у атомов дейтерия, она равна всего лишь 1,9 *км/сек*. При комнатной температуре — 293°К—кинетическая энергия молекул возрастает пропорционально абсолютной температуре, или, что то же самое, пропорционально квадрату скорости. Следовательно, чтобы средняя скорость молекул дейтерия была достаточной для реакции между ядрами, нужно нагреть тяжелый водород до температуры:

$$T = 293 \cdot \frac{3800^2}{1{,}9^2} = 1{,}1 \cdot 10^9 \text{ градусов}.$$

Итак, сталкиваться и реагировать между собой могут только ядра дейтерия, **«нагретые» до температуры свыше миллиарда градусов.** Вот в этом-то и заключается довольно серьезное затруднение для подлинных героев науки — физиков, посвятивших свою жизнь труднейшей и величественнейшей из проблем — стремлению обеспечить энергией будущие поколения.

### Быть может, тяжелую воду можно чем-нибудь заменить?

Ничем. Тяжелая вода как источник тяжелого водорода для термоядерных реакций с целью получения энергии, по-видимому, незаменима. Это следует из того, что необходимая для начала реакции температура очень сильно возрастает по мере увеличения атомного номера элемента. В самом деле, попробуйте сами подсчитать, какой температуре будет соответствовать кинетическая энергия частиц, способных преодолеть электростатическое отталкивание ядер атомов бериллия или кремния. Часть дейтерия можно заменить на тритий, но этого изотопа в природе почти нет.

### Неужели же это все-таки возможно?

Очень трудно, но возможно. Во-первых, природа и физика идут навстречу исследователям: чтобы началась реакция, не нужно, чтобы **весь газ** был нагрет до такой немыслимо чудовищной температуры. Достаточно, если **отдельные атомы** будут обладать в нем столь высокой энергией.

Во всяком газе при любой температуре есть частицы с разными скоростями, от очень малых до очень больших. Благодаря этому реакция между атомами дейтерия будет идти с достаточной скоростью даже и при температуре, в несколько раз меньшей, чем $10^9$ градусов. Это намного облегчает задачу.

Кроме того, существует так называемый туннельный эффект, благодаря которому всегда есть некоторая вероятность, что реакция между ядрами все же может произойти, даже если их кинетическая энергия будет несколько ниже, чем необходимо для преодоления электростатического отталкивания.

Поэтому для начала термоядерного процесса между ядрами тяжелого водорода оказывается вполне достаточной температура всего только в **триста миллионов градусов** (!). Если же вести реакцию между дейтерием и тритием, то будет достаточно и **сорока миллионов градусов.**

### Как же это будет сделано?

Это уже сделано. Физики уже осуществили реакцию термоядерного взрыва, в которой температура, необходимая для начала ядерного синтеза более тяжелых элементов из легких ядер, достигается взрывом атомного заряда — запалом.

Но очень, очень много осталось еще сделать. Ведь нужен человечеству не взрыв, а управляемая реакция— источник энергии для промышленности, для транспорта, для всего, что будет необходимо обществу будущего. Нужна термоядерная «топка» — топка с температурой в сотни миллионов градусов.

Можно быть уверенным, что эта еще более фантастическая задача будет решена. Физики в нашей стране первыми нашли поистине совершенно удивительный путь к созданию термоядерного реактора. Они доказали, что такая «топка» возможна, хотя в природе нет и не может быть материала, способного выдержать такую температуру. Молекулы любого вещества, атомы любого элемента при таком немыслимо чудовищном «жаре» полностью разрушаются и теряют все свои электроны. Все вещества полностью превращаются в плазму — газ, состоящий не из молекул и даже не из атомов, а из свободных атомных ядер и свободных электронов. И несмотря на эту, казалось бы, полную принципиальную невозможность решения, наши ученые нашли путь, как создать такую топку для термоядерного реактора. Они доказали, что ее стенками могут служить мощные электромагнитные поля. Неощутимые, невидимые, прозрачные, они будут непроницаемы для ядер тяжелого водорода и для любых других элементов даже при ста, а может быть, и больше миллионов градусов.

### На сколько времени хватит человечеству энергии, скрытой в воде?

Не менее чем на миллиард лет.

## СВОЙСТВА ВОДЫ

### Почему вода—вода?

Этот вопрос совсем не так неразумен, как это может показаться. В самом деле, разве вода — это только та бесцветная жидкость, что налита в стакан?

Океан, покрывающий почти всю нашу планету, всю нашу чудесную Землю, в котором миллионы лет назад зародилась жизнь,— это вода. Тучи, облака, туманы, несущие влагу всему живому на земной поверхности,— это ведь тоже вода. Бескрайние ледяные пустыни полярных областей, снеговые покровы, застилающие почти половину планеты,— и это вода.

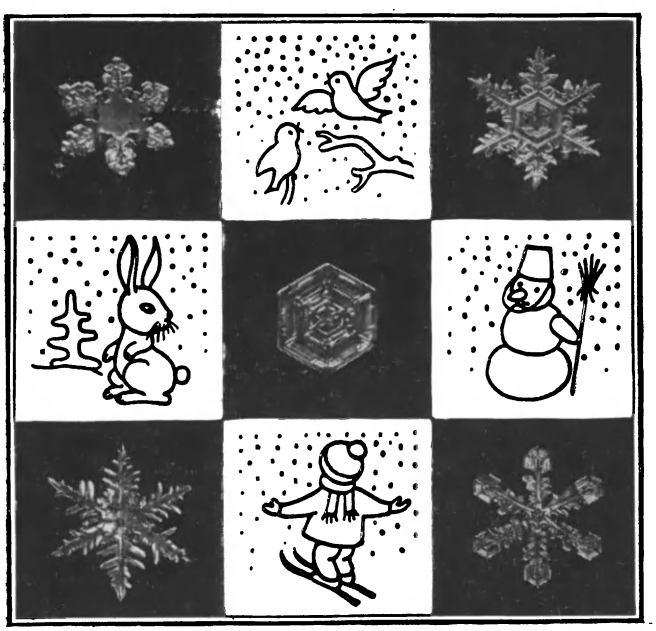
Прекрасно, невоспроизводимо бесконечное многообразие красок солнечного заката, его золотых и багряных переливов; торжественны и нежны краски небосвода при восходе солнца. Эта обычная и всегда необыкновенная симфония цвета обязана рассеянию и поглощению солнечного спектра водяными парами в атмосфере. Этот великий художник природы — вода.

Горные цепи сложены гигантскими толщами сотен различных горных пород, и геологи знают, что большинство из них созданы величайшим строителем природы — водой. Непрерывно изменяется облик Земли. На месте, где возвышались высочайшие горы, расстилаются бескрайние равнины, их создает великий преобразователь — вода.

Безгранично многообразие жизни. Она всюду на нашей планете. Но жизнь есть только там, где есть вода. Нет живого существа, если нет воды.

Почему же одно из бесчисленных химических соединений с простой и ничем не примечательной формулой, состоящее из двух обычных для мироздания элементов, молекула которого состоит всего из трех атомов,— простая окись водорода, самая обычная вода, занимает столь особое место в жизни природы? Чем объясняется такая исключительная роль воды?

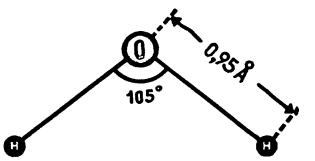
Среди необозримого множества веществ вода с ее физико-химическими свойствами занимает совершенно особое, исключительное место. И это надо понимать буквально. Почти все физико-химические свойства воды — исключение в природе. Она действительно самое удивительное вещество на свете. Она удивительна не только многообразием изотопных форм молекулы и не только надеждами, которые связаны с ней как с неиссякаемым источником энергии будущего. Она удивительна своими самыми обычными свойствами. Простое химическое соединение с простейшей формулой $H_2O$ заняло особое место на нашей чудесной планете благодаря изумительному сочетанию необычайных свойств.



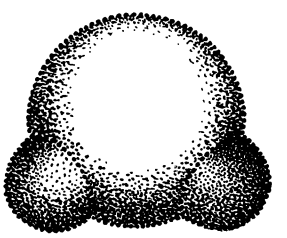
**Правильное кристаллическое строение льда выражается в изумительном изяществе снежинок.**

## Как построена молекула воды?

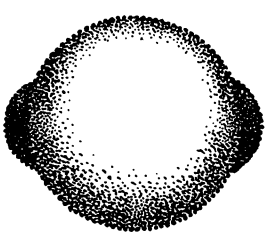
Как построена одна молекула воды, теперь известно очень точно. Она построена вот так:




Хорошо изучено и измерено взаимное расположение ядер атомов водорода и кислорода и расстояние между ними. Оказалось, что молекула воды нелинейна. Вместе с электронными оболочками атомов молекулу воды, если на нее взглянуть «сбоку», можно было бы изобразить вот так:



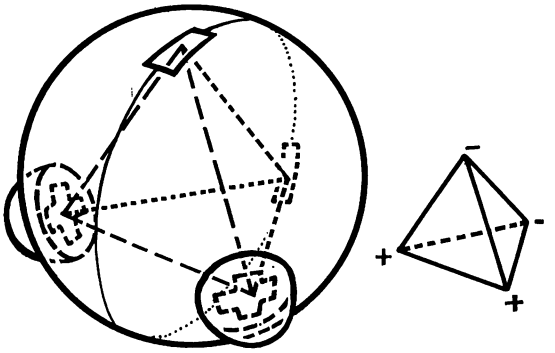
а если взглянуть «сверху» — со стороны атома кислорода, то так:



т. е. геометрически взаимное расположение зарядов в молекуле воды можно изобразить в виде простого тетраэдра.

Такое строение ведет к возникновению необычайно сильного взаимного притяжения молекул воды друг к другу: каждая молекула воды может образовать четыре одинаковые водородные связи с другими молекулами воды.

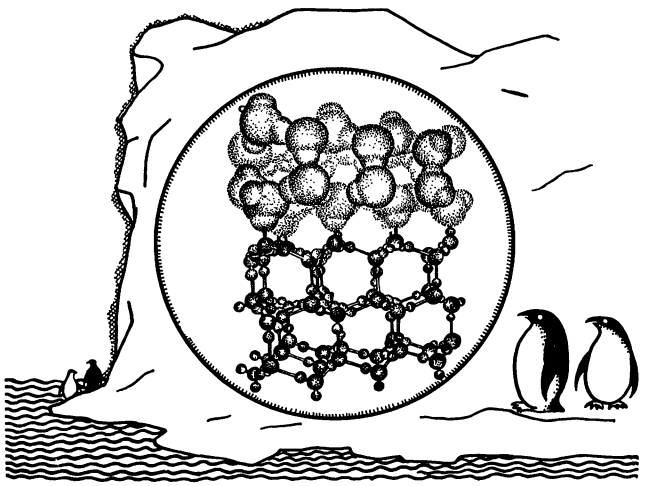
Все молекулы воды с любым изотопным составом построены совершенно одинаково.




**Положительные заряды в молекуле воды связаны с атомами водорода. Отрицательные заряды — это валентные электроны кислорода. Их взаимное расположение в молекуле воды можно изобразить в виде простого тетраэдра.**

## Как построена молекула льда?

Никаких особых молекул льда нет. Молекулы воды благодаря своему замечательному строению соединены в куске льда друг с другом так, что каждая из них связана и окружена четырьмя другими молекулами. Это приводит к возникновению очень рыхлой структуры льда, в которой остается очень много свободного объема. Правильное кристаллическое строение льда выражается в изумительном изяществе снежинок и в красоте морозных узоров на замерзших оконных стеклах.



***Внизу*** **— схематическое расположение атомных ядер водорода и кислорода в молекулах воды, образовавших кристаллическую решетку льда.** ***Вверху*** **— молекулы воды, образовавшие ледяной кристалл с сохранением масштабов электронных оболочек. Обратите внимание на рыхлую структуру льда.**

## Как построены молекулы воды в воде?

К сожалению, этот очень важный вопрос изучен далеко не достаточно. Строение молекул в жидкой воде очень сложно. Когда лед плавится, его сетчатая структура частично сохраняется в образующейся воде. Молекулы в талой воде состоят из многих простых молекул — из агрегатов, сохраняющих свойства льда. При повышении температуры часть их распадается, их размеры становятся меньше.

Взаимное притяжение ведет к тому, что средняя величина сложной молекулы воды в жидкой воде значительно превышает размеры одной молекулы воды. Такое необычайное молекулярное строение воды обусловливает ее необычайные физико-химические свойства.

## При какой температуре вода должна кипеть?

Этот вопрос, конечно, странен. Ведь вода кипит при ста градусах. Это знает каждый. Больше того, всем известно, что именно температура кипения воды при давлении в одну атмосферу и выбрана в качестве опорной точки температурной шкалы, условно обозначенной 100°Ц.

Однако вопрос поставлен иначе: при какой температуре вода должна кипеть? Ведь температуры кипения различных веществ не случайны. Они зависят от положения элементов, входящих в состав их молекул, в периодической системе Менделеева.

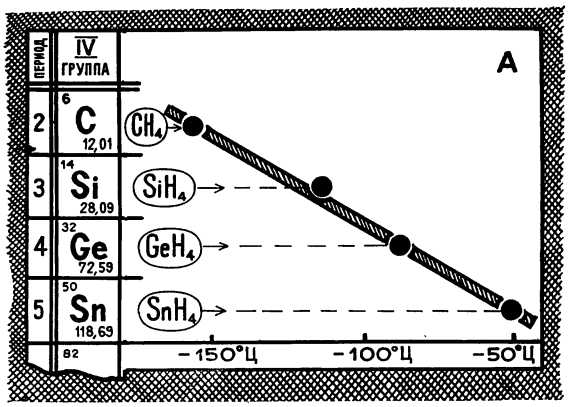
Чем меньше атомный номер элемента, чем меньше его атомный вес, тем ниже температура кипения его соединений. Вода по химическому составу может быть названа гидридом кислорода. $H_2Te$, $H_2Se$ и $H_2S$ — химические аналоги воды. Если проследить за температурами их кипения и сопоставить, как изменяются температуры кипения гидридов в других группах периодической системы, то можно довольно точно определить температуру кипения любого гидрида, так же как и любого другого соединения. Сам Менделеев таким способом предсказал свойства химических соединений еще не открытых элементов.

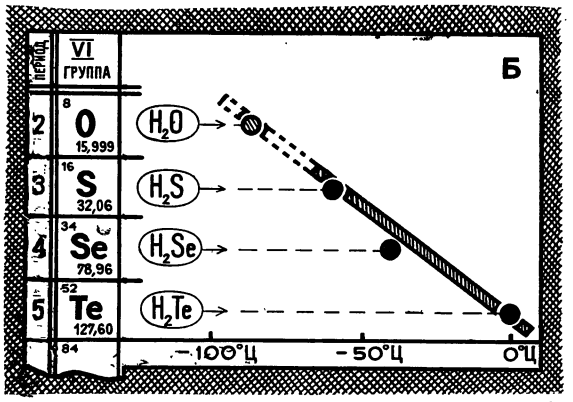
Если же определить температуру кипения гидрида кислорода по положению его в периодической таблице, то окажется, что вода должна кипеть при 80° ниже нуля. Следовательно, вода кипит приблизительно на **сто восемьдесят градусов выше**, чем должна кипеть. Температура кипения воды — это наиболее обычное ее свойство — оказывается необычайным и удивительным.

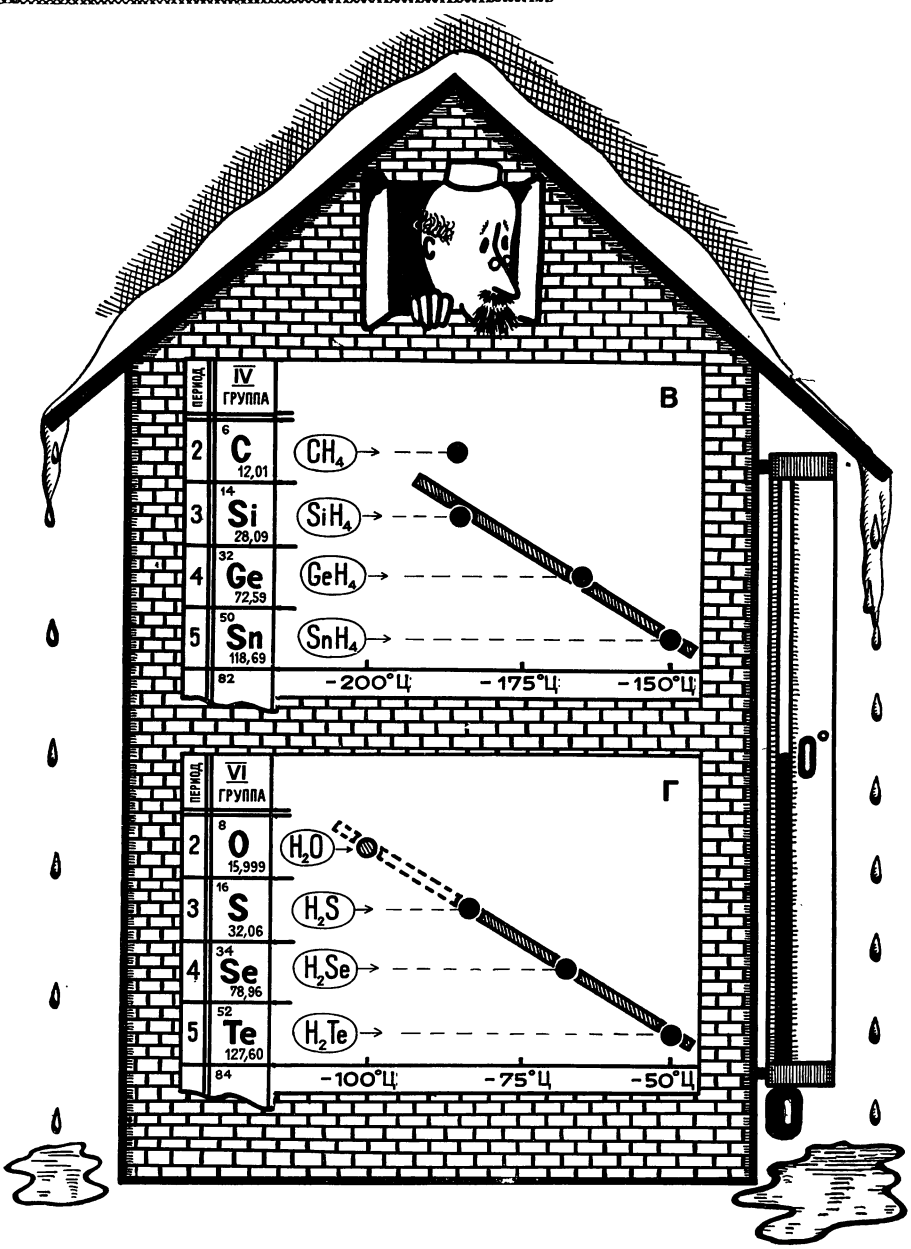
Попробуйте теперь представить себе, что наша вода потеряла вдруг способность образовывать сложные, ассоциированные молекулы. Тогда она, вероятно, должна была бы кипеть при той температуре, какая ей положена в соответствии с периодическим законом. Что бы тогда стало на нашей Земле? Океаны внезапно закипят. На Земле не останется ни одной капли воды, а на небе никогда не сможет больше появиться ни одного облачка... Ведь в атмосфере земного шара температура нигде не падает ниже минус 80° — минус 90°Ц.

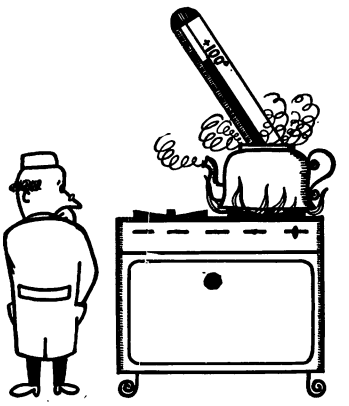
## При какой температуре вода замерзает?

Не правда ли, вопрос не менее странен, чем предыдущий? Ну кто же не знает, что вода замерзает при **нуле градусов**? Это вторая опорная точка термометра. Это самое обычное свойство воды. Но ведь и в этом случае можно спросить, при какой температуре вода должна замерзать в соответствии со своей химической природой. Оказывается, гидрид кислорода на основании его положения в таблице Менделеева должен был бы затвердевать при **ста градусах ниже нуля**.




Свойства любого химического соединения зависят от природы образующих его элементов и, следовательно, от их положения в таблице Менделеева. На этих графиках приведены зависимости температур кипения и плавления водородных соединений элементов IV и VI групп периодической системы. Вода является поразительным исключением. Благодаря очень малому радиусу протона силы взаимодействия между ее молекулами столь велики, что разделить их очень трудно, поэтому вода кипит и плавится при аномально высоких температурах. Кроме воды, в значительно меньшей степени аномальными свойствами обладают аммиак и фтористый водород. График *А*. Нормальная зависимость температуры кипения гидридов элементов IV группы от их места в таблице Менделеева. График *Б*. Среди гидридов элементов VI группы вода обладает аномальными свойствами: должна была бы кипеть при минус 80° — минус 90°Ц, а кипит при плюс 100° Ц. График *В*. Нормальная зависимость температуры плавления гидридов элементов IV группы от их положения в таблице Менделеева. График *Г*. Среди гидридов элементов VI группы вода нарушает порядок: должна была бы плавиться при минус 100° Ц, а ледяные сосульки тают при 0° Ц.

Вода на самом деле очень удивительное вещество. Ее, пожалуй, даже можно назвать непослушным веществом. Она не подчиняется многим физико-химическим закономерностям, справедливым для других соединений, потому что взаимодействие ее молекул необычайно велико и требуется особенно интенсивное тепловое движение молекул, чтобы преодолеть дополнительное притяжение. Это и приводит к такому неожиданному и резкому повышению температур ее кипения и плавления.

Попробуйте и на этот раз пофантазировать: вдруг исчезает ассоциация молекул воды ... немедленно на всей нашей планете исчезают снега и льды. Нельзя кататься на коньках, негде бегать на лыжах; впрочем, и некому тогда было бы кататься и бегать.

## Полагается ли воде быть на Земле жидкой или твердой?

Нет, не полагается. Из того, что температура плавления и кипения гидрида кислорода — его аномальные свойства, следует, что в условиях нашей Земли жидкое и твердое состояния его также аномалии. Нормальным должно было бы быть только газообразное состояние воды.

Невозможным жителям невозможного мира, в котором все свойства воды были бы «нормальны», пришлось бы строить специальные сложные машины, чтобы сжижать такую воду, подобно тому как это делаем мы, получая жидкий кислород.

Самые обычные свойства воды оказываются необычайными и удивительными, если как следует с ними познакомиться и хорошо в них разобраться.

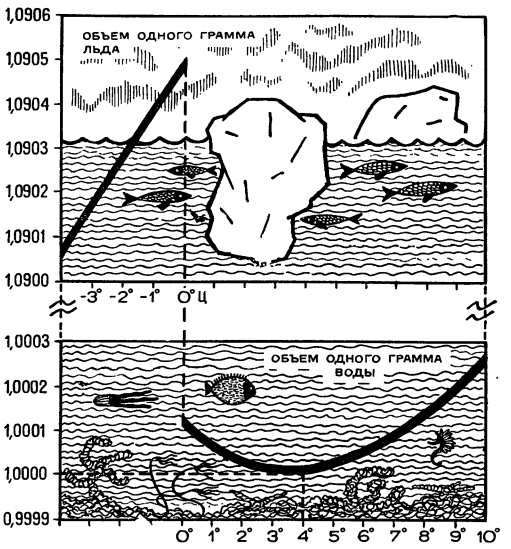
## Сколько существует газообразных состояний воды?

Только одно — пар.

## Сколько существует жидких состояний воды?

На такой вопрос не так просто ответить. Конечно, тоже одно — привычная нам всем жидкая вода. Но вода в жидком состоянии обладает такими необыкновенными свойствами, что приходится задуматься: правилен ли такой простой, казалось бы, не вызывающий никаких сомнений ответ? Вода — единственное в мире вещество, которое после плавления сначала сжимается, а затем по мере повышения температуры начинает расширяться. При +4°Ц у воды наибольшая плотность. Эту редкостную аномалию в свойствах воды объясняют тем, что в действительности жидкая вода представляет собой сложный раствор совершенно необычайного состава: это раствор воды в воде.

При плавлении льда сначала образуются крупные сложные молекулы воды. Они сохраняют остатки рыхлой кристаллической структуры льда и растворены в обычной низкомолекулярной воде. Поэтому сначала плотность воды низкая, но с повышением температуры эти большие молекулы разрушаются, и поэтому плотность воды растет, пока не начнет преобладать обычное термическое расширение, при котором плотность воды снова падает. Если это верно, то возможны несколько




**На графике показано, как изменяются с температурой объемы одного грамма льда и жидкой воды. Эти изменения очень малы, но они имеют большое значение для жизни природы. Такой странной и удивительной зависимостью плотности от температуры обладает только вода. Обратите внимание еще на одно удивительное свойство воды — огромное расширение льда при замерзании. Оно так велико, что графически на одном чертеже представить изменение объема воды при замерзании невозможно. У тяжелой воды температурный ход изменения плотности аналогичен; но замерзает она при 3,8° Ц и наибольшей плотностью обладает при 11,6° Ц.**

состояний воды, только их никто не умеет разделить. И пока неизвестно, удастся ли когда-нибудь это сделать.

Такое необычайное свойство воды имеет огромное значение для жизни. В водоемах перед наступлением зимы постепенно охлаждающаяся вода опускается вниз, пока температура всего водоема не достигнет +4°Ц. При дальнейшем охлаждении более холодная вода остается сверху и всякое перемешивание прекращается. В результате создается необычайное положение: тонкий слой холодной воды становится как бы «теплым одеялом» для всех обитателей подводного мира. При 4°Ц они чувствуют себя явно неплохо.

## Что должно быть легче—вода или лед?

Кто же этого не знает... Ведь лед плавает на воде. В океане плавают гигантские айсберги. Озера зимой покрыты плавающим сплошным слоем льда. Конечно, лед легче воды.

Но почему «конечно»?.. Разве это так ясно? Наоборот, объем всех твердых тел при плавлении увеличивается, и они тонут в своем собственном расплаве. А вот лед плавает в воде. Это свойство воды — аномалия в природе, исключение, и притом совершенно замечательное исключение.

Попробуем вообразить, как выглядел бы мир, если бы вода обладала нормальными свойствами и лед был бы, как и полагается любому нормальному веществу, плотнее жидкой воды. Зимой намерзающий сверху более плотный лед тонул бы, непрерывно опускаясь на дно водоема. Летом лед, защищенный толщей холодной воды, не мог бы растаять. Постепенно все озера, пруды, реки, ручьи промерзли бы нацело, превратившись в гигантские ледяные глыбы. Наконец, промерзли

бы моря, а за ними и океаны. Наш прекрасный цветущий зеленый мир стал бы сплошной ледяной пустыней, кое-где покрытой тонким слоем талой воды. Чудесной аномалией плотности льда и воды обладает наше удивительное вещество.

## Сколько существует льдов?

В природе, на нашей Земле — один: обычный лед. Это самый прекрасный из всех минералов. Никакие алмазы не могут сравниться блеском и красотой со снежинками, искрящимися на солнце. Из этого голубовато-зеленого камня сложены на Земле не только горы и колоссальные ледники, им покрыты целые материки. Лед — горная порода с необычайными свойствами. Он твердый, но течет, как жидкость, и существуют огромные ледяные реки, медленно стекающие с высоких гор. Лед изменчив — он непрерывно исчезает и образуется вновь. Лед необычайно прочен и долговечен — десятки тысячелетий хранит он в себе без изменений тела мамонтов, случайно погибших в ледниковых трещинах.

В своих лабораториях человек сумел открыть еще, по крайней мере, шесть различных, не менее удивительных льдов. В природе их найти нельзя. Они могут существовать только при очень высоких давлениях. Обычный лед сохраняется до давления в 2115 *атм*, но при этом давлении он плавится при —22°Ц. Если давление выше, чем 2115 *атм*, возникает плотный лед — лед-III. Он тяжелее воды и тонет в ней. При более низкой температуре и большем давлении — до 3000 *атм* — образуется еще более плотный лед-II. Давление сверх 5000 *атм* превращает лед в лед-V — этот лед можно нагреть почти до 0°, и он не растает, хотя и находится под огромным давлением. При давлении около 20 000 *атм* возникает лед-VI. Это буквально горячий лед — он выдерживает, не плавясь, температуру +80°Ц. Лед-VII, найденный при давлении 40 000 *атм*, пожалуй, можно назвать раскаленным льдом. Это самый плотный и тугоплавкий из известных льдов. Он плавится только при 175° выше нуля. Некоторые ученые подозревают, что существует еще неустойчивый лед-IV, быстро переходящий в лед-V.

Наверно, человек, расширяя свое познание природы, сумеет в будущем найти еще не один вид льда.

## Что нужно, чтобы лед растаял?

Очень много тепла. Гораздо больше, чем для плавления такого же количества любого другого вещества. Исключительно большое значение скрытой теплоты плавления — 80 калорий на грамм льда — также аномальное свойство воды. При замерзании воды такое же количество тепла снова выделяется.

Когда наступает зима, образуется лед, выпадает снег и вода отдает обратно тепло, подогревает землю и воздух. Они противостоят холоду и смягчают переход к суровой зиме, к жестоким морозам. Именно благодаря этому замечательному свойству воды на нашей планете существуют осень и весна.

## Сколько тепла нужно, чтобы нагреть воду?

Очень много. Больше, чем для нагревания равного количества любого другого вещества. Чтобы нагреть грамм воды на один градус, необходима одна калория. Это больше чем вдвое превышает теплоемкость любого химического соединения.

Вода — вещество, необычайное даже в самых обыденных для нас свойствах. Конечно, эта особенность воды имеет очень большое значение не только при варке обеда на кухне. Вода — это великий распределитель тепла по Земле. Нагретая Солнцем под экватором, она переносит тепло в Мировом океане гигантскими потоками морских течений в далекие полярные области, где жизнь возможна только благодаря этой удивительной особенности воды.

## Как вода попадает в облака?

Очень просто. Солнце нагревает воду. Всюду, где она есть,— в луже, в пруду, в море, в океане. Вода поглощает в своем тонком верхнем слое почти всю энергию попадающих на нее солнечных лучей и испаряется. Молекулы воды исключительно просты в своем строении и вместе с тем необычайны, отличны от всех других молекул. Они сильно притягиваются друг к другу благодаря силам межмолекулярного притяжения за счет дополнительных водородных связей. Солнцу приходится затрачивать очень много энергии, чтобы разделить молекулы воды, чтобы превратить ее в пар. Нет ни одного вещества, у которого бы скрытая теплота испарения была бы больше, чем у воды. Вода — лучший теплоноситель. Ничто не может сравниться с ней. Ничто не может лучше работать в паровых турбинах электростанций, в цилиндрах паровых двигателей.

Вода — гигантский двигатель и в природе. Метеорологи подсчитали, что Солнце испаряет на Земле за одну минуту **миллиард** тонн воды. Каждую минуту миллиард тонн водяного пара вместе с восходящими потоками нагретого воздуха поднимается в верхние слои атмосферы. Каждый грамм водяного пара уносит с собой 537 калорий солнечной энергии.

На большой высоте, где давление мало, воздух расширяется, его температура сильно понижается и водяной пар конденсируется, снова превращаясь в воду,— ее мельчайшие капельки образуют облака.

Энергия Солнца, поднятая с водяным паром вверх, неминуемо должна выделиться обратно, когда он превращается в облака. Эта энергия переходит в тепловую, нагревая воздух. Каждую минуту водяной пар отдает атмосфере Земли чудовищно огромное количество энергии: $2{,}2 \cdot 10^{18}$ *дж*. Столько энергии за то же время могли бы выработать сорок миллионов электростанций, по миллиону киловатт каждая.

Это та энергия, которая переносит сотни миллиардов тонн воды по воздуху в облаках и орошает дождями всю поверхность Земли. Это та энергия, за счет которой дуют ветры, возникают бури, рождаются ураганы и штормы. А только один развившийся ураган выделяет энергию, эквивалентную энергии тридцати тысяч атомных бомб.

## Почему в море вода соленая?

Это, пожалуй, одно из самых важных следствий одного из самых удивительных свойств воды. В ее молекуле центры положительных и отрицательных зарядов сильно смещены относительно друг друга. Поэтому вода обладает исключительно высоким, аномальным значением диэлектрической проницаемости. Для воды $\varepsilon=80$, а для воздуха и вакуума $\varepsilon=1$. Это значит, что два

любых разноименных заряда в воде взаимно притягиваются друг к другу с силой в 80 раз меньшей, чем в воздухе. Ведь по закону Кулона

$$f = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\varepsilon \cdot r^2}.$$

Но все межмолекулярные связи во всех телах, определяющие прочность тела, обусловлены взаимодействием между положительными зарядами атомных ядер и отрицательными электронами. На поверхности тела, погруженного в воду, силы, действующие между молекулами или атомами, ослабевают под влиянием воды почти в сотню раз. Если оставшаяся прочность связи между молекулами становится недостаточной, чтобы противостоять действию теплового движения, молекулы или атомы тела начинают отрываться от его поверхности и переходят в воду. Тело начинает растворяться, либо распадаясь на отдельные молекулы, как сахар в стакане чая, либо на заряженные частицы— ионы, как поваренная соль.

Именно благодаря аномально высокой диэлектрической проницаемости вода — один из сильнейших растворителей. Она способна растворить любую горную породу на земной поверхности. Медленно и неотвратимо она разрушает даже граниты, выщелачивая из них наиболее легко растворимые составные части. Нет в природе такой прочной породы, которая могла бы сопротивляться всемогущему разрушителю — воде.

Ручьи, речки и реки сносят растворенные водой примеси в океан. Вода из океана испаряется и вновь возвращается на землю, чтобы снова и снова продолжать свою вечную работу. А растворенные соли остаются в морях и океанах.

Не думайте, что вода растворяет и сносит в море только то, что легко растворимо, и что в морской воде содержится только обычная соль, которая стоит на обеденном столе. Нет, морская вода содержит в себе почти все элементы, существующие в природе. В ней есть и магний, и кальций, и сера, и бром, и йод, и фтор. В меньшем количестве в ней найдены железо, медь, никель, олово, уран, кобальт, даже серебро и золото. Свыше шестидесяти элементов нашли химики в морской воде. Наверное, будут найдены и все остальные. Больше всего в морской воде поваренной соли. Поэтому вода в море соленая.

А знаете ли вы, что кровь человека и других животных близка по составу к морской воде? И что растения извлекают из земли питательные вещества в виде водного раствора? Если бы вода не обладала удивительным свойством — необычайно высокой диэлектрической пропицаемостью, море не было бы соленым. Но это некому было бы заметить — не было бы на Земле жизни.

## Распадаются ли в воде на ионы ее собственные молекулы?

Да, распадаются. Молекулы воды очень прочны, но все же очень небольшая часть их диссоциирует на ионы: $H_2O = H^+ + OH^-$. При этом из каждого миллиарда молекул воды при обычной температуре диссоциированы всего лишь только две молекулы.

Свободный протон $H^+$ — ядро атома водорода,— конечно, не может существовать в водной среде: ион водорода немедленно присоединяется к молекуле воды и образует ион гидроксония $H_3O^+$.

## Видал ли хоть кто-нибудь воду?

Этот вопрос может показаться нелепым. Однако если быть строгим и точным в ответах, то придется сказать, что нет — **воду** пока еще, наверное, никто не видал и не держал в руках. То, что налито в стакане и что мы по привычке называем водой, на самом деле всегда представляет собой **раствор** очень многих веществ в воде. В ней растворены газы: азот, кислород, аргон, углекислота — и все примеси, находящиеся в воздухе. В ней растворены соли из почвы, железо из водопроводных труб. В ней растворены, наверное, сотни, а может быть, и тысячи различных соединений почти всех элементов периодической системы. В ней взвешены мельчайшие нерастворимые частицы пыли. Это мы и называем «чистой водой».

Много ученых работают над решением трудной проблемы получения абсолютно чистой воды. Но пока еще получить такую воду не удалось. Да и как это сделать: налитая в стакан вода растворяет стенки стакана, соприкасаясь с любым газом, она растворяет газ.

Очень тщательно очищенная и освобожденная от газов вода приобретает совершенно необычайные свойства: ее можно перегреть на десятки градусов выше точки кипения—она не закипит, ее можно очень сильно переохладить — она не замерзнет.

## Почему вода «мокрая»?

Вода не очень «мокрая», если считать, что этот шутливый вопрос относится к способности воды смачивать другие тела. Большинство жидкостей гораздо «мокрее» воды. Вода с трудом смачивает металлы, совершенно не смачивает жирные поверхности. Водой не намочишь парафин. Капли воды скатываются с поверхности многих полимерных материалов: тефлона, полиэтилена и др. Спирт же, например, или керосин очень хорошо смачивают почти любые тела. Это объясняется тем, что силы взаимодействия между молекулами воды так необычайно велики, что вода собирается в капли там, где все другие жидкости растекаются.

Это свойство воды причиняет много огорчений в обыденной жизни и в технике: загрязненные жиром или маслами руки водой не отмоешь. Из-за этого и было изобретено мыло. Химиками было синтезировано много специальных веществ — «смачивателей», которые очень широко применяются в технике, чтобы воду сделать «мокрее».

## Какую форму имеет вода?

Хотя этот вопрос может показаться странным, но он задан совершенно правильно. Вода обладает собственной формой, как и любая другая жидкость. Ее форма — шар. Утверждение учебников, что вода принимает форму сосуда, а собственной не имеет, неверно. Ее собственная форма на Земле обычно искажена силой тяжести.

Но что воде свойственна форма шара, в этом очень легко убедиться — достаточно слетать на космическом корабле в космос и вытряхнуть там воду из бутылки. Можно увидеть это и на Земле: посмотрите на падающую каплю или выдуйте хороший мыльный пузырь. Во всех этих случаях действие силы тяжести исключено и вода принимает свою собственную форму.

В условиях невесомости вода принимает форму шара.

## Можно ли бегать по поверхности воды?

Можно. Чтобы в этом убедиться, посмотрите летом на поверхность любого пруда или озера. По воде не только ходит, но и бегает немало живого и быстрого народца. Если учесть, что площадь опоры лапок у этих насекомых очень мала, то нетрудно понять, что, несмотря на их небольшой вес, поверхность воды выдерживает, не прорываясь, значительное давление.

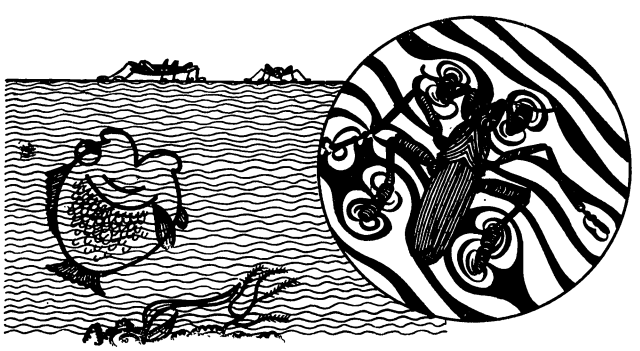
## Может ли вода течь вверх?

Да, может. Это происходит всегда и повсеместно. Сама поднимается вода вверх в почве, смачивая всю толщу земли от уровня грунтовых вод. Сама поднимается вода вверх по капиллярным сосудам дерева и помогает растению доставлять растворенные питательные вещества на большую высоту — от глубоко скрытых в земле корней к листьям и плодам. Сама движется вода вверх в порах промокательной бумаги, когда вам приходится высушивать кляксу, или в ткани полотенца, когда вытираете лицо. В очень тонких трубочках — в капиллярах — вода может подняться на высоту до нескольких метров.

## Чем это объясняется?

Еще одной замечательной особенностью воды — ее исключительно большим поверхностным натяжением. Молекулы воды на ее поверхности испытывают действие сил межмолекулярного притяжения только с одной стороны, а у воды это взаимодействие аномально велико. Поэтому каждая молекула на ее поверхности втягивается внутрь жидкости. В результате возникает сила, стягивающая поверхность жидкости. У воды она особенно велика: ее поверхностное натяжение составляет 72 *дин/см*.

Эта сила и придает мыльному пузырю, падающей капле и любому количеству жидкости в условиях невесомости форму шара. Она поддерживает бегающих по поверхности пруда жуков, лапки которых водой не смачиваются. Она поднимает воду в почве, стенки тонких пор и отверстий в ней, наоборот, хорошо смачиваются водой. Вряд ли вообще было бы возможно земледелие, если бы вода не обладала бы этой исключительной особенностью.



Поверхностное натяжение воды столь велико, что по ней спокойно могут гулять, как посуху, довольно крупные водяные насекомые, вроде этих.

## Все ли свойства воды понятны ученым?

Конечно, нет! Вода — загадочное вещество. До сих пор ученые не могут еще понять и объяснить очень многие ее свойства. Непонятно, например, почему вода не только изменяет некоторые свойства при воздействии на нее магнитного поля, но и надолго сохраняет эти изменения. В такой воде иначе идут реакции осаждения. Многие соли из обычной воды выпадают при ее испарении в форме плотного осадка, образуя накипь (посмотрите в чайник). «Намагниченная» вода накипи не образует. Почему это так — никто не знает. Но то, что явление это еще не понято и пока не объяснено, нисколько не мешает инженерам с успехом применять его в технике для борьбы с накипью в котлах тепловых электростанций.

Недавно было обнаружено новое загадочное явление. Оказалось, что вода на Земле изменяет свою природу в зависимости от того, что происходит на Солнце и в космосе. Было замечено, что космические причины влияют на характер протекания в воде некоторых химических процессов, например на скорость появления осадков. Почему — неизвестно.

Многие наблюдения и факты говорят о том, что талая вода обладает особыми свойствами — она более благоприятна для развития живых организмов. Почему — тоже неизвестно.

Можно не сомневаться, что все подобные загадки будут успешно разрешены наукой. Будет открыто еще немало новых, более удивительных загадочных свойств воды — самого необыкновенного вещества в мире.

## Все ли свойства воды уже перечислены в этой статье?

Нет, к сожалению, далеко не все. Не хватило места даже для наиболее интересных. Но тот, кто захочет подробно познакомиться со всеми свойствами воды, которые уже изучены, сможет это сделать самостоятельно.

Для этого ему нужно будет прочесть во всех научных библиотеках мира все уже вышедшие журналы и книги, где напечатаны научные работы по химии, физике, биологии, физиологии, биохимии, биофизике, геологии, геохимии. Придется изучить и многие работы по астрономии и астрофизике (интересно, есть ли вода на планетах, в межзвездном про-

странстве, в далеких галактиках? И как ее там ищут астрономы?). Надо будет изучить работы по зоологии и ботанике (ни животные, ни растения без воды жить не могут). Рыбы и микроорганизмы живут в воде — придется читать работы по ихтиологии и микробиологии.

Само собой разумеется, что нельзя пропустить книги по гидрологии, океанологии, лимнологии (это очень интересная наука об озерах), необходимо также изучить работы ученых по теории рек, их образовании и жизни, тщательно проработать все, что известно по гляциологии (это очень важная наука о свойствах льда — она помогает строить большие города на далеком севере), по спелеологии (ведь пещеры в недрах Земли созданы водой, и это тоже ее свойство).

Без термодинамики нельзя понять роль воды в энергетике (ведь все тепловые электростанции работают на паре, а гидростанции — на воде). Придется изучить и ядерную физику (зачем атомной энергетике нужна тяжелая вода). Есть еще очень обширная и трудная наука — гидравлика.

Придется изучить ряд разделов электротехники — без этой науки нельзя усвоить электрохимию, большинство процессов которой протекает в водных растворах.

Где и какие реки, моря и океаны расположены на Земле, рассказано в работах по географии. Совершенно особые свойства воды изучает навигация — наука о кораблевождении и теория кораблестроения.

Очень много интересного о воде можно узнать из книг по метеорологии — науке, которая изучает, почему рождаются тучи и идет из них дождь.

Нельзя оставить без внимания научные работы по медицине — и в человеке все жизненные процессы протекают в водной среде.

Может быть, вы думаете, что можно пропустить сочинения по истории, по экономике? Нет, их развитие определялось на нашей планете водными путями сообщения.

Наверное можно назвать, если хорошенько подумать, еще много отраслей знаний, в которых изучаются свойства воды. Попробуйте подумать сами.

## Все ли уже известно о воде?

Совсем еще недавно, немного лет назад, химики были уверены, что состав воды им хорошо известен. Но однажды одному из них пришлось измерить плотность остатка воды после электролиза. Он был удивлен: плотность оказалась на несколько стотысячных долей выше нормальной. В науке нет ничего незначительного. Эта ничтожная разница потребовала объяснения. В результате учеными было открыто много новых больших тайн природы. Они узнали, что вода очень сложна. Были найдены новые изотопные формы воды. Добыта из обычной тяжелая вода; оказалось, что она совершенно необходима для энергетики будущего. Теперь во всех странах мира физики упорно и неустанно работают над решением этой великой задачи. А началось все с простого измерения самой обычной, будничной и неинтересной величины — плотность воды измерена точнее на лишний десятичный знак.

Каждое новое более точное измерение, каждый новый верный расчет не только повышают уверенность в знании и надежности уже добытого и известного, но и раздвигают границы неведомого и еще не познанного и прокладывают к ним новые пути.

Нет предела человеческому разуму, нет предела его возможностям; и то, что мы теперь так много знаем о природе и свойствах поистине самого удивительного в мире вещества — о **воде**, открывает перед вами, перед теми, кто читает сейчас эту книгу, еще большие, неограниченные возможности. И кто может сказать, что вы еще узнаете, что откроете нового, еще более необычайного. Умейте только видеть и удивляться.

Вода, как и все в мире, неисчерпаема.

■

## Откуда на Земле взялась вода?

**Вечно, по всем направлениям, Вселенную пронизывают потоки космических лучей—потоки частиц с огромной энергией. Больше всего в них протонов — ядер атомов водорода. В своем движении в космосе наша планета непрерывно подвергается «протонному обстрелу». Пронизывая верхние слои земной атмосферы, протоны захватывают электроны, превращаются в атомы водорода и немедленно вступают в реакцию с кислородом, образуя воду. Расчет показывает, что ежегодно почти полторы тонны такой «космической» воды рождается в стратосфере. На большой высоте при низкой температуре упругость водяного пара очень мала и молекулы воды, постепенно накапливаясь, конденсируются на частицах космической пыли, образуя таинственные серебристые облака. Ученые предполагают, что они состоят из мельчайших ледяных кристалликов, возникших из такой космической воды. Подсчет показал, что воды, появившейся таким образом на Земле за всю ее историю, как раз хватило бы, чтобы родились все океаны нашей планеты. Значит, вода пришла на Землю из космоса? Но...**

**Геохимики не считают воду небесной гостьей. Они убеждены, что у нее земное происхождение. Породы, слагающие земную мантию, которая лежит между центральным ядром Земли и земной корой, под влиянием накапливающегося тепла радиоактивного распада изотопов местами расплавлялись. Из них выделялись летучие составные части: азот, хлор, соединения углерода, серы, больше всего выделялось водяных паров. Сколько же воды могли выбросить при извержениях все вулканы за все время существования нашей планеты? Ученые подсчитали и это. Оказалось, что такой изверженной «геологической» воды тоже как раз хватило бы, чтобы заполнить все океаны.**

**Интересно все-таки было бы знать: откуда же на Земле взялась вода?**

# СПРАВОЧНЫЙ ОТДЕЛ

## ВСЕМУ МИРУ — ОДНУ МЕРУ

### (Система единиц измерения)

### СРАВНЕНИЕ И СЧЕТ

В жизни, особенно в науке и технике, люди часто измеряют расстояния, вес, время и т. п. Чтобы измерить какую-нибудь величину, например вес камня или глубину реки, ее сравнивают с другой известной величиной, выбранной в качестве единицы измерения,— с килограммом или метром. Результат измерения выражается числом единиц, содержащихся в измеряемой величине, например: вес камня — 10 *кг*, глубина реки — 3 *м*. Измерение позволяет нам оценивать различные масштабы предметов и явлений.

В каждом языке есть названия всевозможных предметов и явлений природы. Но без количественного исчисления и без сравнения предметов сведения о них были бы неполными. С развитием общения между людьми, с расширением торговли и ростом науки появилась необходимость в количественном измерении. А измерение невозможно без счета и без единиц измерения, с которыми сравниваются величины.

Самое простое измерение — счет целыми числами. Ими можно измерить и сравнить количество одинаковых и неделимых предметов — 8 человек, 3 лошади, 5 деревьев. Стадо в 100 овец вдвое больше стада в 50 овец. К такому счету мы привыкли так же, как к родному языку.

Привыкли мы и к нашей десятичной системе счета, общепринятой во всем мире: единицы объединяются в десятки, десятки — в сотни, сотни — в тысячи. Но существовали и иные системы счета. В древнем Вавилоне употребляли шестидесятичную систему счета. Мы пользуемся ею и сейчас, когда измеряем время: 60 секунд — минута, 60 минут — час. Деление года на 12 месяцев, окружности на 360 градусов — все это наследие вавилонской системы счета.

Существует двоичная система счета, где за основание числа берется не 10, как в десятичной, а 2. Так считают и электронно-вычислительные машины.

Целыми числами можно измерить количество одинаковых, неделимых предметов — людей, животных, деревьев. А как измерить расстояние между городами, количество зерна, воды? Для этого нужны единицы измерения, с которыми можно было бы сравнивать эти величины. Расстояние или длину можно измерить количеством шагов или сравнить их с размерами различных частей человеческого тела — рук, ног. В древних странах, в Египте, Вавилонии, Греции, единицей длины был локоть — длина руки человека от локтя до кончиков пальцев (рис. 1). В древней Руси единицами длины были: сажень — расстояние между концами пальцев разведенных в стороны рук (рис. 2); аршин, равный примерно длине руки; вершок — длине среднего сустава большого пальца. Но так как длина локтя, ступни, размаха рук у разных людей различны, то локти, футы и сажени у разных народов несколько отличались друг от друга. Локоть в Египте равнялся 0,45 *м*, а в Греции — 0,51 *м*.

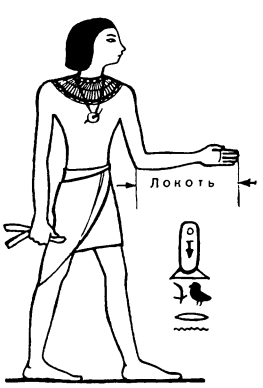



Рис. 1.

Разнообразие единиц очень усложняло торговлю и обмен сведениями. Переводить одни единицы измерения в другие было гораздо труднее, чем переводить с одного языка на другой названия предметов. И люди пришли к выводу, что лучше всем народам иметь одинаковые единицы измерения.

### КАКИМИ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Эти единицы мер должны быть удобными и неизменными. Удобными — это значит, что результат измерения наиболее часто встречающихся величин должен выражаться наименьшим количеством слов. Не-

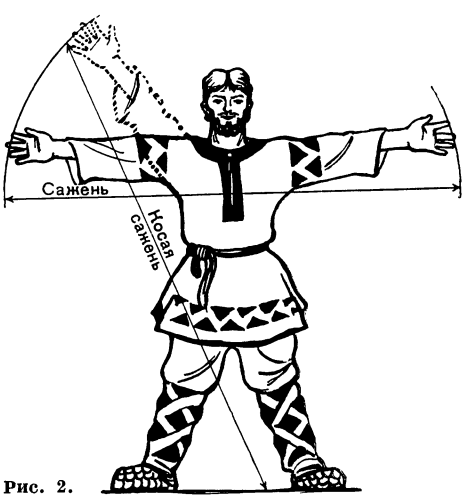



Рис. 2.

лепо, например, рост человека измерять микронами: 1 млн. 650 тыс. *мк*. Для науки вообще нельзя придумать «удобную» единицу — ей приходится измерять и расстояния до звезд, и размер атома, длительность молний, и возраст Вселенной. Если это нужно, ученые сами придумывают удобную для науки единицу, например: расстояния во Вселенной удобно мерять световыми годами, световой год = $9{,}46 \cdot 10^{15}$ *м*, а сечения атомных ядер — барнами. Барн = $10^{-28}$ $м^2$.

Но самое важное, чтобы принятые единицы были одинаковыми у всех народов и стран. Для этого в каждой стране хранят образцы (э т а л о н ы) измерительных единиц. Эти эталоны периодически сверяют друг с другом, и правительства обязывают всех граждан своих стран пользоваться только этими единицами. Важно также, чтобы неизменность единиц измерения могла быть проверена каким-нибудь неизменным и вечным природным эталоном. Например, единицу времени — секунду сверяют с временем оборота Земли вокруг Солнца. Для точных наук особенно важно, чтобы эталоны единиц в различных государствах были настолько одинаковы,насколько это возможно для современного уровня техники. Два эталона метра, отличающиеся друг от друга всего на одну миллионную долю (микрон), для физика-оптика уже два разных «метра»; ясно, что сравнение измерений, сделанных этими двумя метрами, теряет для него ценность.

## МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ

Первый шаг к единой Международной системе единиц был сделан после Великой французской революции 1789 г. Тогда в Европе почти в каждом государстве была своя система единиц, свои меры. Французские ученые изобрели новую систему — м е т р и ч е с к у ю и предложили всем странам принять ее. Идея метрической системы очень проста. Система счисления — десятичная, единица длины—метр—определенная часть меридиана Земли. Единицей времени была принята секунда — $^1/_{86400}$ доля земных суток. Основные единицы — метр и секунда—могли быть в любое время проверены естественным эталоном: размером земного шара и временем его оборота вокруг своей оси.

С максимальной точностью, с помощью геодезических измерений, была измерена дуга Парижского меридиана от Дюнкерка до Барселоны; одна сорокамиллионная часть длины этого меридиана была названа специально изобретенным словом м е т р. Из твердого и прочного сплава платины с иридием был изготовлен эталон метра, хранящийся в Архиве Франции (рис. 3).

За единицу массы был принят вес 1 $дм^3$ чистой воды при 4° Ц и назван к и л о г р а м м о м. Из того же сплава изготовили эталон килограмма (рис. 4). Эталоны метра и килограмма, так же тщательно изготовленные, были разосланы во все страны. Есть эти эталоны и у нас, они хранятся в Палате мер и весов.

Эталоном единицы времени были установлены сутки. Измеряли время по часам или хронометрам, сверяя их с астрономическими данными. Другие единицы измерения, например единицы площади, скорости и т. п., образовались от основных: квадратный метр, метр в секунду.

К концу прошлого века в науке и технике появился целый ряд систем единиц. Они различались тем, что, например, в одних (СГС) за основные единицы были приняты сантиметр, грамм-масса, секунда, в других

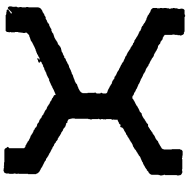


**Рис. 3. Поперечный разрез эталона метра. Такая форма эталона предохраняет его от прогибания и других деформаций.**

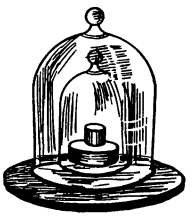


**Рис. 4. Эталон массы — 1 *кг*.**

(МКГСС) — метр, килограмм-сила, секунда. Создатели систем доказывали, что их системы самые удобные. Как бы то ни было, переход от одной системы к другой был затруднителен, так как единицы измерений в этих системах сильно отличались друг от друга. За единицу электрической емкости в системе СГС принималась емкость шарика радиусом в 1 *см*, а в практической системе—емкость шарика радиусом в 9 млн. *км* (фарада).

Для введения новых единиц и систем собирались международные Генеральные конференции. В 1960 г. XI Генеральная конференция рассмотрела и утвердила единую М е ж д у н а р о д н у ю с и с т е м у — С И (System Jnternational — SI) и рекомендовала во всех странах пользоваться только ею. СИ опирается на 6 основных единиц, из которых могут быть получены всевозможные единицы для измерения любых физических величин. Вот ее основные единицы: **метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, свеча.** Для измерения углов установлены дополнительные единицы — **радиан** и **стерадиан.**

Единица длины — **метр.** Прежнее определение метра оказалось неточным. Меридиан длиннее, чем 40 000 000 *м*, а изготовленный в 1795 г. платино-иридиевый эталон так и остался эталоном метра. Но еще более неприятным оказалось, что метр и его эталоны, разосланные в разные страны, со временем, в результате перекристаллизации в сплаве, изменились. Ученые обнаружили это, измеряя эталоны при помощи световых волн. При этом они открыли, что длина волн света, излучаемого атомами некоторых элементов, гораздо постояннее, чем металлический эталон метра. С помощью приборов интерферометров-компараторов (сравнителей) можно определить разницу между двумя эталонами, равную сотой доле длины световой волны. Особенно пригодной для этой цели оказалась длина волн оранжевого свéта, излучаемого инертным газом криптоном-86 при прохождении через него электрического тока — она наиболее постоянна и легко измерима. Но металлический эталон все равно нужен, нельзя же каждую деталь или расстояние до планет и звезд измерять при помощи световых волн. Поэтому ученые рекомендовали проверять неизменность эталона метра длиной световых волн криптона-86. Длина этой волны принята за естественный эталон. Величина метра теперь определяется так: метр есть длина, равная 1650763,73 длины волны излучения криптона-86. Эталон метра проверяют, измеряя число световых волн, укладывающихся в нем; по эталону изготовляют линейки, калибры и другие измерительные инструменты.

Чтобы понять, как сравнивают эталон метра с длиной волны света, надо знать физику и особенно ее раздел оптику (см. ст. «Свет»). Из волновой оптики известно, что если световые волны, отраженные, например, от двух зеркал, приходят в одну точку и при этом разница между длиной их пути равна нулю или составляет чет-

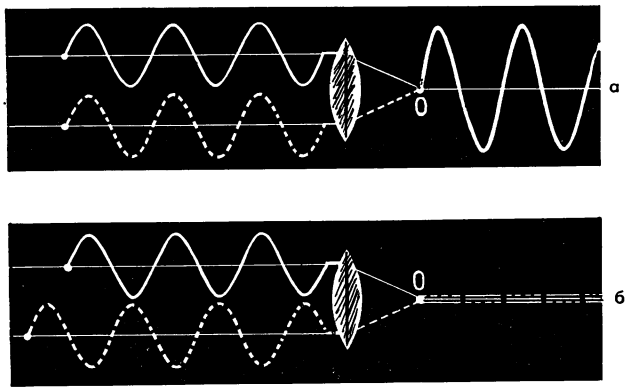



Рис. 5.

ное число полуволн, то в этой точке амплитуды волн складываются и интенсивность света усиливается. Если же эта разница равна нечетному числу полуволн (волны приходят в точку в противоположной фазе), то их амплитуды вычитаются и интенсивность света резко уменьшается (рис. 5).

На металлическом брусе устанавливают два зеркала: верхнее может передвигаться при помощи винта (рис. 6). Плоскость верхнего точно совмещают с поверхностью нижнего неподвижного зеркала. На оба зеркала направляют по узкому лучу света от криптоновой лампы, отраженные лучи сводят линзой в одну точку и наблюдают за ее освещенностью. Когда поверхности обоих зеркал точно совмещены, разность хода между отраженными лучами равна нулю и в точке мы видим светлое пятно. Стоит сдвинуть верхнее зеркало вправо на длину в четверть волны, как отраженный от него луч придет в точку с опозданием на одну полуволну и в точке не будет видно света — он погасится благодаря интерференции. Если верхнее зеркало сдвинуть вправо еще на четверть волны, луч «опоздает» на две полуволны и свет в точке усилится. Расстояние между поверхностями зеркал будет в этом случае равно половине длины световой волны. Наблюдатель постепенно передвигает

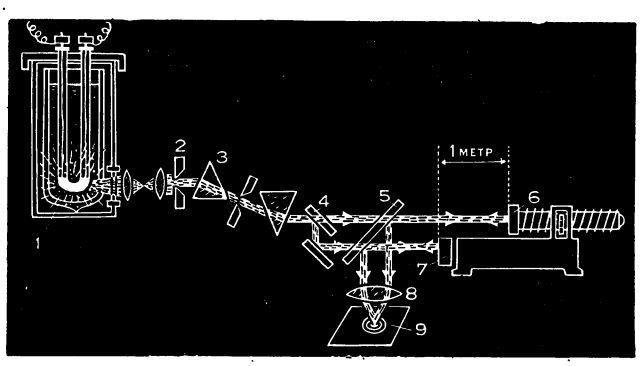



**Рис. 6. Схема измерения длины метра с помощью световых волн. *1* — криптоновая лампа, погруженная для стабильности излучения в сосуд с жидким азотом. Линзы и коллиматор (*2*) формируют свет лампы в узкий пучок. Призмы (*3*) и коллиматор выделяют из спектра криптона-86 его оранжевую линию. Полупрозрачное зеркало *4* раздваивает световой пучок; часть лучей проходит через полупрозрачные зеркала *4* и *5* и отражается от зеркала *6*; другая часть лучей, отраженная зеркалами (*4*), пройдет через зеркало *5* и отразится от зеркала *7*. Лучи, отраженные от зеркал *6* и *7*, отразятся и от зеркала *5*, пройдут через линзу *8* и совместятся в одной точке на экране *9*.**

верхнее зеркало и подсчитывает вспышки и гашения. Когда он насчитает их 3301527,46, расстояние между поверхностями зеркал станет равным 1 метру. Сосчитать более трех миллионов вспышек и гашений света трудно, поэтому чаще всего таким методом измеряют не целый метр, а эталон в 1 или 10 *см*.

Излучение криптона-86 получают, пропуская электрический ток через трубку с разреженным криптоном (давление несколько миллибар); его оранжевое излучение с длиной волны $6057{,}8021 \cdot 10^{-10}$ *м* выделяют из спектра призмой. Чтобы излучение было более однородным (монохроматичным), при разряде поддерживают строго определенную силу тока, а трубку со светящимся криптоном помещают в сосуд с жидким азотом при температуре 73,3°К(—199,8° Ц).

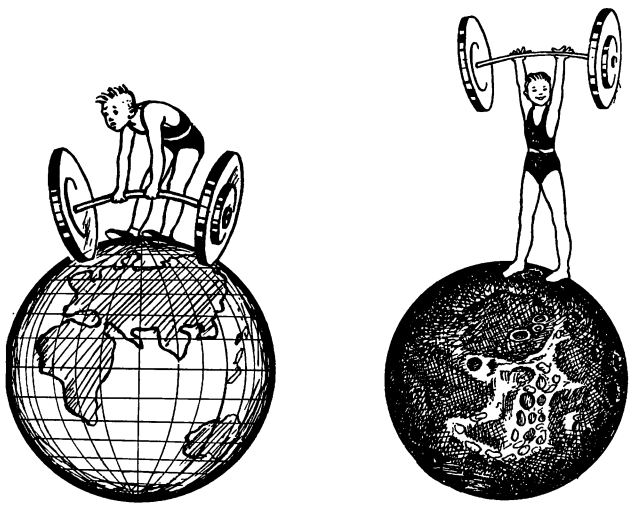
Точность измерения величины определяется числом достоверно известных знаков в результате измерения. Метр измерен числом длин волн, выраженным девятью знаками,—это значит, что точность определения эталона не менее одной миллиардной. С такой же точностью (но не большей) можно измерить длину в любых опытах.

За единицу массы — **килограмм** — принята масса платино-иридиевого эталона, хранящегося в Международном бюро мер и весов. Прежнее определение килограмма как массы 1 литра воды при 4° Ц тоже оказалось неточным. 1 литр весит на 27 *мк* меньше, чем изготовленный во Франции эталон килограмма. Но в отличие от платино-иридиевого эталона длины масса эталона килограмма совершенно не меняется со временем, и сравнить эталон с его копиями можно с большой точностью — до нескольких миллиардных долей.

Согласно определениям механики **масса есть мера инерционности тел**. Масса тела тем больше, чем больше атомов входит в его состав. Вес же по второму закону Ньютона есть с и л а, с которой Земля (или другое небесное тело) притягивает к себе тело данной массы. **Вес равен произведению массы тела на ускорение силы тяжести.** На Луне, например, где ускорение силы тяжести в 6 раз меньше, чем на Земле, во столько же раз будет меньше и вес нашего, земного килограмма. А на Юпитере— в 2,4 раза больше, на Солнце — больше в 28 раз! Масса же, например, у эталона килограмма во всех этих случаях не изменится. Наконец, на борту спутника вес массы любого тела при состоянии невесомости равен нулю. Даже на Земле в разных ее местах вес тела одной и той же массы изменяется: не везде одинаково ускорение силы тяжести. Земля не идеальный шар, она немного сплюснута у полюсов. Вблизи полюсов $g = 9{,}83$ *м/сек*$^2$, а на экваторе — 9,78 *м/сек*$^2$. Поэтому в качестве основной единицы в системе СИ принята единица массы тела (*кг*), которая не изменяется в любых условиях, тогда как вес тела зависит от ускорения силы притяжения. В тех же случаях, когда надо подчеркнуть, что говорится не о массе, а именно о весе, его обозначают *кгс* (килограмм-сила).

«Позвольте,— скажете вы.— Давайте взвесим на Земле кусок металла на весах с гирями; пусть он весит ровно 1 *кгс*. Затем полетим на Луну вместе с этим куском, гирями и весами и взвесим там. Что же, он будет там весить меньше?» Да, и на Луне весы будут в равновесии, вес куска металла и гири в 1 *кгс* будут равны друг другу. Взвешивая на чашечных весах с гирями, мы на самом деле измеряем н е в е с т е л а, а м а с с у, сравнивая вес тела и вес гирь. Вот если бы мы взвешивали кусок металла на пружинных весах, то на Луне его вес, т. е. сила, с которой он растянул бы пружину весов, была бы в 6 раз меньше. Сопротивление пружины растяжению не зависит от ускорения силы тяжести, а определяется только свойством материала. Итак, на чашеч-

ных весах нельзя определить вес тела. Просто мы привыкли употреблять слово «вес» вместо слова «масса». Эти понятия надо уметь различать и четко знать, что такое вес и что такое масса. Вес — это сила, с которой Земля притягивает к себе тела различной массы. В системе СИ вес (силу) измеряют в ньютонах. Вес массы в 1 *кг* на Земле равен 9,81 *н*, на Луне — 1,5 *н*. Когда обычно говорят, что тело весит 2 *кгс*, это значит, что оно притягивается к Земле так же, как и гиря массой в 2 *кг*. В физических единицах веса системы СИ оно весит, т. е. притягивается к Земле, с силой в 19,62 *н*.



Вернемся к эталону килограмма. Почему не приняли для него какой-либо естественный эталон, например массу углеродного атома? Принята же она в физике за единицу атомной массы элементов, и они измеряются ею с точностью до $10^{-12}$. Оказывается, что взвесить любой атом с помощью атома углерода ученые могут с величайшей точностью, но взвесить сам атом углерода или другой атом пока не могут. Казалось бы, можно очень точно взвесить на весах кристалл алмаза (ведь он состоит из чистого углерода), сосчитать число атомов в нем, высчитать таким образом вес одного атома и определить эталон килограмма числом атомов углерода, как определили длину метра числом световых волн. Но точно сосчитать число атомов в кристалле пока не удается. Число Авогадро ($6{,}0248 \cdot 10^{23}$), показывающее, сколько атомов содержится в грамм-атоме какого-либо элемента, известно пока еще с точностью не больше одной стотысячной. Такая точность для эталона недостаточна.

Единица времени — **секунда**. Эта единица, как уже говорилось, родилась в Вавилоне. И до недавнего времени, как и 6 тыс. лет назад, ее определяли как $^1/_{86\,400}$ часть средних солнечных суток — времени оборота Земли вокруг своей оси.

Точные исследования показали, однако, что Земля вращается вокруг своей оси неравномерно и замедляет свой оборот на 0,002 секунды в столетие. Из-за этого в величине секунды появляется неопределенность до одной десятимиллионной. В системе СИ значение секунды уточнено. За естественный эталон секунды принята длительность тропического года — так называют астрономы промежуток времени между весенними равноденствиями (23 марта). Ради еще большей точности выбран определенный тропический год, между весенними равноденствиями 1899 и 1900 гг., и принято, что в том году содержалось 31556925,9747 секунды. Точность определения секунды таким образом достигает одной стомиллиардной.

Практически время измеряют с помощью хронометров, сверяемых по сигналам точного времени, которые передаются по радио. Эти сигналы подаются при помощи точнейших кварцевых часов, в которых использовано свойство кварцевой пластинки, вырезанной из кристалла горного хрусталя: пластинка эта совершает в секунду строго определенное число колебаний — это очень точный маятник. Кварцевые часы обычно устанавливают в крупнейших обсерваториях, так как эти часы приходится сверять с временем, в которое Земля завершает годовой оборот вокруг Солнца. Еще точнее кварцевых изобретенные совсем недавно атомные или молекулярные часы. В них использовано свойство возбужденных атомов цезия или молекул аммиака совершать неизменное число колебаний в секунду.

Единица силы электрического тока — **ампер**. Значение, или эталон, этой единицы устанавливается на основе открытого Ампером фундаментального закона о взаимодействии электрических токов, протекающих по параллельным проводникам. Ампер — это сила тока, который, проходя по двум параллельным проводникам, расположенным в метре друг от друга, вызывает между ними силу притяжения, равную $2 \cdot 10^{-7}$ *н* на каждый метр проводов. Для воспроизведения эталонного тока в 1 *а* применяют токовые весы (рис. 7). Ток пропускают через две катушки: одна из них неподвижна, а другая прикреплена к коромыслу точных аналитических весов. Подвижная катушка может втягиваться внутрь неподвижной, когда через них пропущен ток. Силу втягивания можно очень точно измерить, уравновесив ее весом гирь на другом плече коромысла весов. Определенный таким образом ампер не нуждается в естественном эталоне, так как он установлен посредством единиц длины и силы.

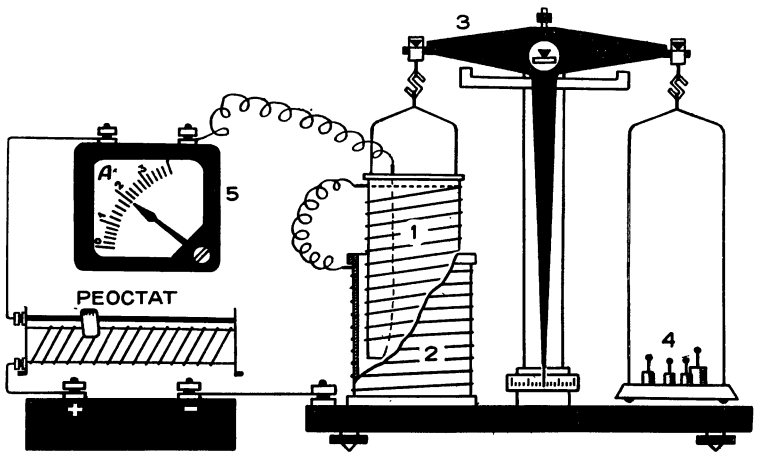



**Рис. 7. Токовые весы. По обмоткам двух катушек (*1* и *2*), вставленных друг в друга, течет ток. Катушка *1* подвешена к коромыслу весов *3*. Силу, втягивающую катушку *1* в катушку *2*, уравновешивают весом гирь *4*. Токовыми весами градуируют амперметр *5*, которым затем будут измерять силу тока в любых других электрических цепях.**

Конечно, можно было бы определить единицу силы тока (ампер) или единицу количества электричества (кулон) естественным эталоном — зарядом электрона. Но опять-таки заряд электрона (или число электронов, составляющих кулон) известен еще с недостаточной точностью, чтобы его можно было принять за эталон единицы в системе СИ. 1 $e = 1{,}60202 \cdot 10^{-19}$ *к*. Взаимодействием катушек с током можно определить ампер так же точно, как определены эталоны длины, массы и времени.

Единица измерения температуры — **градус** термодинамической шкалы Кельвина. Кельвин — английский ученый, установивший значение абсолютного нуля температур. В шкале Кельвина абсолютный нуль — 0°К. Это наинизшая температура. Если бы ее можно было достичь, при ней прекратилось бы движение всех атомов и молекул. Термодинамической эта шкала называется потому, что измерение температуры в ней производится на основании термодинамических законов состояния газов. Согласно одному из этих законов давление идеального газа при неизменном его объеме пропорционально его термодинамической температуре. Как наиболее идеальные для измерения температуры подходят газы гелий и водород. Термодинамическую температуру измеряют гелиевым или водородным термометром, определяя давление газа в замкнутом неизменном объеме, принимающем температуру измеряемого тела.

Для практических измерений температуры пользуются жидкостными или электрическими термометрами, шкалой и градусами Цельсия. Градус Цельсия в точности равен градусу Кельвина, но в шкале Цельсия за 0°принята температура тающего льда при нормальном атмосферном давлении 1,018 *бар*, а температура кипения воды при том же давлении принята за 100°Ц. В шкале Кельвина 0°Ц соответствует 273,15°К — на одну сотую градуса ниже, чем температура неизменного сосуществования всех трех фазовых состояний воды — льда, жидкости и паров — 273,16°К. В жидкостном термометре изменение температуры определяют по изменению объема жидкости (ртути, спирта), заполняющей шарик термометра при его нагревании или охлаждении. В электрических термометрах (термопарах, термисторах) используется свойство некоторых металлов или сплавов изменять свои электрические характеристики (термоэлектродвижущая сила, сопротивление) в зависимости от температуры. Высокую температуру тел (пламени, Солнца, звезд) измеряют, основываясь на законах излучения нагретыми телами инфракрасных или световых волн: чем выше температура тела, тем больше коротких волн содержится в спектре его излучения.

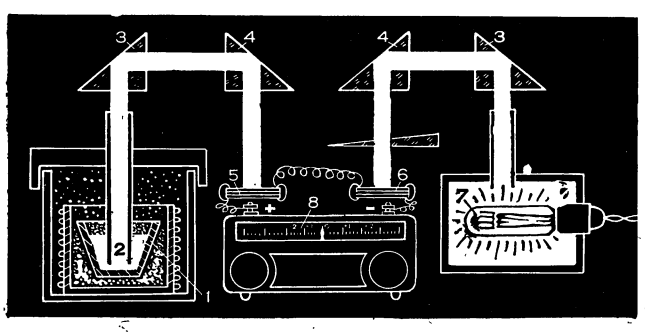



**Рис. 8. Схема получения эталона света.** *1* **— тигель, сделанный из окиси тория;** *2* **— расплавленная платина;** *3* **и** *4* **— отражательные призмы;** *5* **и** *6* **— фотоэлементы;** *7* **— измеряемый источник света;** *8* **— шкала сравнения.**

Единица силы света — **свеча**. Это одна шестидесятая доля силы света, излучаемого 1 $см^2$ поверхности затвердевающей платины. Свечение платины при температуре ее затвердевания (2046°К) оказалось более постоянным и воспроизводимым эталоном силы света, чем применявшиеся ранее эталоны свечи — масляная лампа Карселя, лампа Гефнер-Альтенека, где горел амилацетат, или электролампы, питаемые строго определенным током.

Для сравнения с силой света какого-либо другого источника, например электрической лампы, свет от 1 $см^2$ платины, застывающей в тигле (сделанном из тугоплавкой окиси тория), выводится через трубочку из той же окиси тория в оптическую систему сравнения (рис. 8).

Для измерения углов введены две дополнительные единицы — **радиан** и **стерадиан**. Радианом измеряют плоские углы. Это угол, опирающийся на дугу окружности, равную по длине ее радиусу. Стерадиан — единица измерения телесного угла — равен телесному углу с вершиной в центре сферы и опирающемуся на участок сферы, равный по площади квадрату радиуса.

Из основных и дополнительных единиц выводят производные единицы для измерения любых физических величин. Например, единица скорости — метр в секунду (*м/сек*), ускорения — $м/сек^2$. Единица силы — **ньютон** — сила, которая сообщает ускорение в 1 $м/сек^2$ телу массой в 1 *кг* — $кгм/сек^2$. Единица работы и энергии — **джоуль** — работа, совершаемая силой в 1 *н* на длине пути в 1 *м*, и т. д. Ряд важнейших производных единиц приведен в таблице (на стр. 529).

Иногда результаты измерений приходится выражать очень большими или очень малыми числами. Они одинаково неудобны для произношения и написания. В системе СИ признано целесообразным применять кратные и дольные единицы, образуемые при помощи приставок. Километр — это 1000 *м*, киловатт — 1000 *вт*. Приставка **«мега»** означает, что кратная единица в миллион раз больше основной: мегаом = $10^6$ *ом*, мегаватт = $10^6$ *вт*. При помощи приставки **«милли»** образуются тысячные доли — миллиграмм, миллиампер. Миллионные доли единицы образуются приставкой **«микро»** — микрофарада, микросекунда. Для образования кратных, которые в 10 раз больше единиц, используют приставку **«дека»**; в 100 раз больше — **«гекто»** (гектоватт, гектар); в 10 раз меньше — **«деци»** (дециметр); в 100 раз меньше — **«санти»** (сантиметр).

Доли секунды образуются при помощи приставок «милли», «микро», т. е. соответственно десятичной системе счисления. А кратные секунде единицы — минута, час, равные 60 и 3600 секундам, — так и не поддаются десятичной системе.

## И ВСЕ ЖЕ ЕДИНИЦ НЕ ХВАТАЕТ!

Эталоны основных единиц Международной системы определены с максимально возможной для современной науки точностью. Система СИ принята как основная в большинстве стран мира, в ней есть единицы для измерения всевозможных физических величин. И все же их не хватает. Наряду с единицами СИ допускается использование и ряда внесистемных единиц. Большинство из них настолько употребительны и привычны, что нет ни пользы, ни смысла их отменять. Они

## Важнейшие производные единицы в системе СИ

| Наименование физической величины | Название единицы | Сокращенное обозначение | Чему равна новая единица в прежних единицах | Почему или в честь кого она названа |
|---|---|---|---|---|
| Скорость | метр в секунду | *м/сек* | 3,60 *км/час* | — |
| Ускорение | метр на секунду в квадрате | *м/сек*$^2$ | 0,102 ускорения силы тяжести | — |
| Сила | ньютон | *н* | 0,102 *кгс*<br>$10^5$ *дин* | И. Ньютон |
| Давление | ньютон на квадратный метр | *н/м*$^2$ | $10^{-5}$ *бар*<br>$1{,}02 \cdot 10^{-5}$ техн. атм<br>$0{,}981 \cdot 10^{-5}$ физич. атм<br>$0{,}752 \cdot 10^{-2}$ *мм* ртутного столба | |
| Работа, энергия | джоуль | *дж* | 0,102 *кгс·м*<br>$10^7$ *эрг*<br>0,24 малой калории<br>$6{,}25 \cdot 10^{18}$ *эв* | Д. Джоуль |
| Мощность | ватт | *вт* | $1{,}36 \cdot 10^{-3}$ *л. с.* | Д. Уатт |
| Частота | герц | *гц* | | Г. Герц |
| Количество электричества | кулон | *к* | $6{,}25 \cdot 10^{18}$ зарядов электрона, $3 \cdot 10^9$ единиц СГС | Ш. Кулон |
| Потенциал электрического поля | вольт | *в* | 1/300 единиц СГСЭ* | А. Вольта |
| Напряженность электрического поля | вольт на метр | *в/м* | | |
| Электрическое сопротивление | ом | *ом* | | Г. Ом |
| Напряженность магнитного поля | ампер на метр | *а/м* | $1{,}256 \cdot 10^{-2}$ эрстед | — |
| Световой поток | люмен | *лм* | — | по-гречески «лампа», «свеча» |
| Освещенность | люкс | *лк* | — | по-латыни «свет» |
| Яркость | нит | *нт* | — | по-гречески «сверкать» |
| Электрическая емкость | фарада | *ф* | $9 \cdot 10^{11}$ *см* | М. Фарадей |

* СГСЭ — электростатическая система измерений — «сантиметр-грамм-секунда».

очень удобны для измерения различных величин не только в науке и технике, но и в повседневной жизни.

Кроме часа и минуты, можно назвать еще единицу измерения плоских углов — г р а д у с (1°=0,017453 радиана). Градусами пользуются в геометрии, навигации, геодезии. В технике часто имеют дело с м и к р о н а м и (1 *мк*= $10^{-6}$ *м*). По правилу образования дольных единиц его настоящее название — микрометр, но так уже давно называют прибор для точного измерения размеров. Поэтому и пришлось оставить этой единице внесистемное название.

Длины световых волн, расстояния между атомами в молекулах выражают в а н г с т р е м а х (Å=$10^{-10}$ *м*). Длина волны желтого излучения натрия равна, например, $5{,}896 \cdot 10^{-7}$ *м*, а если выразить в ангстремах, то 5896 Å. Расстояние между атомами углерода в кристалле алмаза — 1,54 Å. Единица эта названа в честь шведского физика Ангстрема.

Для измерения массы служат удобные внесистемные единицы т о н н а — 1000 *кг* и ц е н т н е р — 100 *кг*.

Для измерения давления предлагается удобная единица — б а р, равная $10^5$ *н/м*$^2$. Единица давления в системе СИ (*н/м*$^2$) слишком мала, ею неудобно пользоваться. Нормальное атмосферное давление равно $1{,}018 \cdot 10^5$ *н/м*$^2$. Выраженное в барах, оно равно 1,018 *бар*. Эта единица очень близка и к т е х н и ч е с к о й а т м о с ф е р е, широко употреблявшейся ранее: 1 *атм*=0,9806 *бар*.

В атомной физике очень удобна и употребительна для измерения энергии микрочастиц внесистемная единица э л е к т р о н-в о л ь т: 1 *эв* = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ *дж*. Средняя тепловая энергия молекул воздуха равна 0,035 *эв*, а энергия, выделяющаяся при распаде ядра урана, — около 200 мегаэлектрон-вольт.

Астрономы для измерения расстояний до звезд применяют п а р с е к, равный 3,26 светового года, или $3{,}084 \cdot 10^{16}$ *м*; с в е т о в о й г о д — путь, проходимый светом за год ($9{,}46 \cdot 10^{15}$ *м*).

Для измерения земельных площадей употребительны единицы — г е к т а р (10 000 *м*$^2$), а р (100 *м*$^2$).

Тепло (энергию) измеряют в калориях. К а л о р и я — тепло, необходимое для нагревания 1 *г* воды на 1°Ц. 1 калория = 4,187 *дж*. По-видимому, эта единица скоро будет полностью вытеснена и заменена принятым в СИ джоулем.

Кроме внесистемных, долго еще будут пользоваться некоторыми своеобразными и интересными единицами. Л о ш а д и н а я  с и л а — какой живучей оказалась эта единица мощности, придуманная Д. Уаттом, изобретателем паровой машины, более 200 лет назад!

По вековой морской традиции скорость кораблей измеряют узлами. У з е л — это 1,852 *км/час*. Язык не повернется у моряка сказать, что скорость корабля 36 *км/час*. Он скажет: 20 узлов.

А летчики совсем недавно ввели для себя новую единицу скорости — м а х,— равную скорости звука в воздухе — 334 *м/сек*, или 1188 *км/час*. Теперь очередь за космонавтами — у них есть свои единицы скорости: **первая космическая** — 8 *км/сек* и **вторая космическая** — 11,2 *км/сек*.

## Перевод наиболее употребительных единиц старых и специальных систем измерения в единицы системы СИ

| Наименование величины | Единица измерения | Чему равна эта единица в системе СИ |
|---|---|---|
| Длина | микрон | $10^{-6}$ *м* |
| | ангстрем | $10^{-10}$ *м* |
| | световой год | $9{,}46 \cdot 10^{15}$ *м* |
| | парсек | $30{,}8 \cdot 10^{15}$ *м* |
| | астрономическая единица | $1495981 \cdot 10^{5}$ *м* |
| Площадь | гектар | $10^{4}$ $м^2$ |
| | ар (сотка) | $10^{2}$ $м^2$ |
| Объем | литр | $10^{-3}$ $м^3$ |
| Скорость | *км/час* | 0,278 *м/сек* |
| | мах (скорость звука) | 334 *м/сек* |
| | узел (морской) | 0,501 *м/сек* |
| Ускорение | *g* — ускорение силы тяжести | 9,81 $м/сек^2$ |
| Сила | дина | $10^{-5}$ *н* |
| | килограмм-сила | 9,81 *н* |
| | грамм-сила | $9{,}81 \cdot 10^{-3}$ *н* |
| Работа, энергия | эрг | $10^{-7}$ *дж* |
| | *кгс·м* | 9,81 *дж* |
| | ватт-час | 3600 *дж* |
| | калория | 4,187 *дж* |
| | электрон-вольт | $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ *дж* |
| | энергия 1 атомной единицы массы | $1{,}496 \cdot 10^{-10}$ *дж* |
| Масса | тонна | $10^{3}$ *кг* |
| | центнер | 100 *кг* |
| | углеродная атомная единица массы | $1{,}6603 \cdot 10^{-27}$ *кг* |
| Мощность | килограмм-метр в секунду | 9,81 *вт* |
| | эрг в секунду | $10^{-7}$ *вт* |
| | лошадиная сила | 735,5 *вт* |

| Наименование величины | Единица измерения | Чему равна эта единица в системе СИ |
|---|---|---|
| Давление | бар | $10^{5}$ $н/м^2$ |
| | техническая атмосфера 1 $кгс/см^2$ | $9{,}81 \cdot 10^{4}$ $н/м^2$ |
| | физическая атмосфера (760 *мм* ртутного столба) | $1{,}018 \cdot 10^{5}$ $н/м^2$ |
| | 1 *мм* водяного столба | 9,81 $н/м^2$ |
| Количество электричества | единица СГСЭ | $3{,}33 \cdot 10^{-10}$ *к* |
| | заряд электрона | $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ *к* |
| Потенциал электрического поля | единица СГСЭ | 300 *в* |
| Напряженность электрического поля | киловольт/*см* | $10^{5}$ *в/м* |
| | единица СГСЭ | 30000 *в/м* |
| Электрическое сопротивление | единица СГСЭ | $9 \cdot 10^{11}$ *ом* |
| Электрическая емкость | сантиметр | $1{,}11 \cdot 10^{-12}$ *ф* |
| | пикофарада | $10^{-12}$ *ф* |
| Напряженность магнитного поля | эрстед | 79,58 *а/м* (на виток) |
| Частота | кюри | $3{,}7 \cdot 10^{10}$ *гц* |
| Яркость | стильб (свеча/$см^2$) | $10^{4}$ *нт* |
| Освещенность | фот (люмен/$см^2$) | $10^{4}$ *лк* |

## ЧТО ОЗНАЧАЛИ СТАРЫЕ ЕДИНИЦЫ

До введения метрической и Международной систем измерения в различных странах существовали свои, национальные единицы и системы измерения, узаконенные государственной властью. Разбираться в них интересно не только историкам, каждому интересно, как возникали эти единицы.

На заре человек ждал восход солнца, и, как только показывался его краешек, он вставал и шел навстречу ему, пока оно полностью не поднималось над горизонтом. Пройденное человеком за это время расстояние называлось стадией. В разных странах стадии немного отличались, но все же были примерно одинаковы: в Вавилонии стадия была равна 194 *м*, в Египте—174,5 *м*, в древней Греции — 185 *м*. Места, где проводились соревнования атлетов и бегунов, размечались стадиями, и от этого пошло название — стадион. Впрочем, мы пользуемся и самим словом «стадия», обозначая им этап развития какого-либо процесса.

Некоторыми единицами люди пользовались еще в недалеком прошлом — всего 50—100 лет назад. Знать их необходимо, потому что они часто встречаются в литературе — русской, европейской, американской. Вспомните хотя бы «20 000 лье под водой» Жюля Верна или «451° по Фаренгейту» Рея Брэдбери. Произведения литературы — не учебники, в них не заменишь национальные единицы на международные. Встречаясь в этих произведениях с прежними единицами измерения, хочется сравнить их с привычными нам. Верста, туаз, лье — сколько это метров или километров?

Вот какими были, например, старые российские меры: в версте было 500 саженей, в сажени — три аршина, в аршине — 16 вершков. 1 вершок равен 4,445 *см*. Четыре вершка составляли пядь— 17,78 *см*. Аршин равен 71,12 *см*, сажень — 2,133 *м*, верста — 1,066 *км*. В 1709 г. Петр Великий постановил принять за эталон аршина английский дюйм. Он издал указ: в аршине должно быть 28 английских дюймов. С тех пор русские меры стали соизмеримыми с английскими дюймами, а дюйм — это 2,54 *см*. В России было введено еще десятичное деление дюйма: в дюйме 10 линии по 2,54 *мм*, в линии 10 точек по 0,254 *мм* каждая. Основной мерой площади земли была десятина — 1,09 *га*. Наиболее часто встречающиеся меры объема: ведро — 12,3 *л*, штоф— 1,23 *л*. Русская мера веса — фунт — равна 409 *г*. В фунте было 32 лота, в лоте — 3 золотника по 4,26 *г*. Всего в фунте 96 золотников. 40 фунтов составляли пуд — 16,4 *кг*. И до сих пор у нас урожай зерна чаще всего измеряют в пудах.

В литературе могут встретиться старинные единицы веса, до сих пор применяемые специалистами. Мерой массы (веса) драгоценных камней служит карат. Он равен 0,2 *г*. Слово это арабское, означает оно — стручок рожкового дерева, семена которого служили в глубокой древности мерой веса. Для взвешивания лекарств в аптеках существует целая система единиц. Наиболее употребительна из них — гран. Он равен 0,062 *г*. В прошлом веке это была самая маленькая единица веса, и потому она даже вошла в поговорку, например: «ни грана правды».

Широко распространена в мире британская система мер. Единица длины в ней — ярд (0,914 *м*). Фут (по-английски «ступня ноги») равен 30,49 *см*. В футе 12 дюймов по 2,54 *см*. Британские единицы мер были установлены еще в средние века, и только в 1965 г. английский парламент принял решение перевести все измерения в королевстве в метрическую систему. От средних веков в Англии пока останется сложная денежная система. Своеобразны в Англии единицы измерения больших расстояний. Есть миля сухопутная и морская. Сухопутная миля равна 1,609 *км*, морская — 1,853 *км*. Морская мера скорости — узел, это одна морская миля в час. Британский фунт (0,453 *кг*) содержит 16 унций по 28,35 *г*. Британская тонна равна 2240 фунтам (1016 *кг*).

Своеобразна и применяемая в Англии и в США шкала температур Фаренгейта, появившаяся в 1715 г. Фаренгейт — один из первых изобретателей знакомого нам жидкостного термометра. За нуль градусов своей шкалы он принял температуру смеси льда с нашатырем (хлористым аммонием), думая, что это наинизшая температура на Земле. По шкале Цельсия — это минус 17,7°. За вторую точку шкалы Фаренгейт принял температуру тела здорового человека, приписав ей значение 96°. По шкале Цельсия — это 37,3°. Перевести температуру из градусов Фаренгейта в шкалу Цельсия можно по формуле

$$t°Ц = \frac{5}{9}(T°Ф - 32); \qquad T°Ф = \frac{9}{5}\,t°Ц + 32.$$

0°Ц соответствует 32°Ф, температура кипения воды (100°Ц) соответствует 212°Ф. Восьмидесятиградусный мороз в рассказах Джека Лондона — это минус 62°Ц.

Редко, но встречается шкала Реомюра. Перевести ее в шкалу Цельсия просто: надо число градусов Реомюра умножить на $^5/_4$. 0° Р совпадает с 0°Ц, температура кипения воды по Реомюру 80°Р=100°Ц.

Старинная французская мера длины туаз= =1,97 *м*; величиною она довольно близка к русской сажени. Лье — единица измерения больших расстояний — равно примерно 4,5 *км*. На ровной местности это соответствует расстоянию до видимой линии горизонта.

В этой статье мы рассказали о единицах измерения— подробнее о современных и коротко о старых и старинных. С развитием науки людям придется изучать и измерять величины, характерные для новых физических явлений, и придумывать для этого новые единицы. Например, придумали, как измерять количество информации, которую вы получили, прочитав, например, эту статью. Информация измеряется в битах.

Приходится измерять и, казалось бы, совсем неизмеримые величины: интенсивность запаха, силу землетрясений и штормов, даже успеваемость учеников. Пока все это, в том числе и успеваемость ученика, не измеряют, а оценивают баллами. Придет время, и люди научатся совершенно точно определять, скажем, успеваемость в единицах запомнившейся ученику информации, скажем в мегабитах.

А знаете ли вы, чем измеряют количество и полезность труда, совершенного человеком? Деньгами. И эту свою роль деньги правильно выполняют только в социалистическом обществе, где осуществляется принцип «каждому—по труду».

Измеряют и силу взрыва ядерных бомб — в килотоннах и мегатоннах взрывчатки. Вот уж этой «единице» пожелаем исчезнуть и забыться как можно скорее и навсегда!

Развитие системы единиц измерения неотделимо от развития науки и техники, требующих повысить точность измерений и точность эталонов измерительных единиц. Точные измерения—одно из основных средств науки в открытии неведомых еще тайн и законов природы.

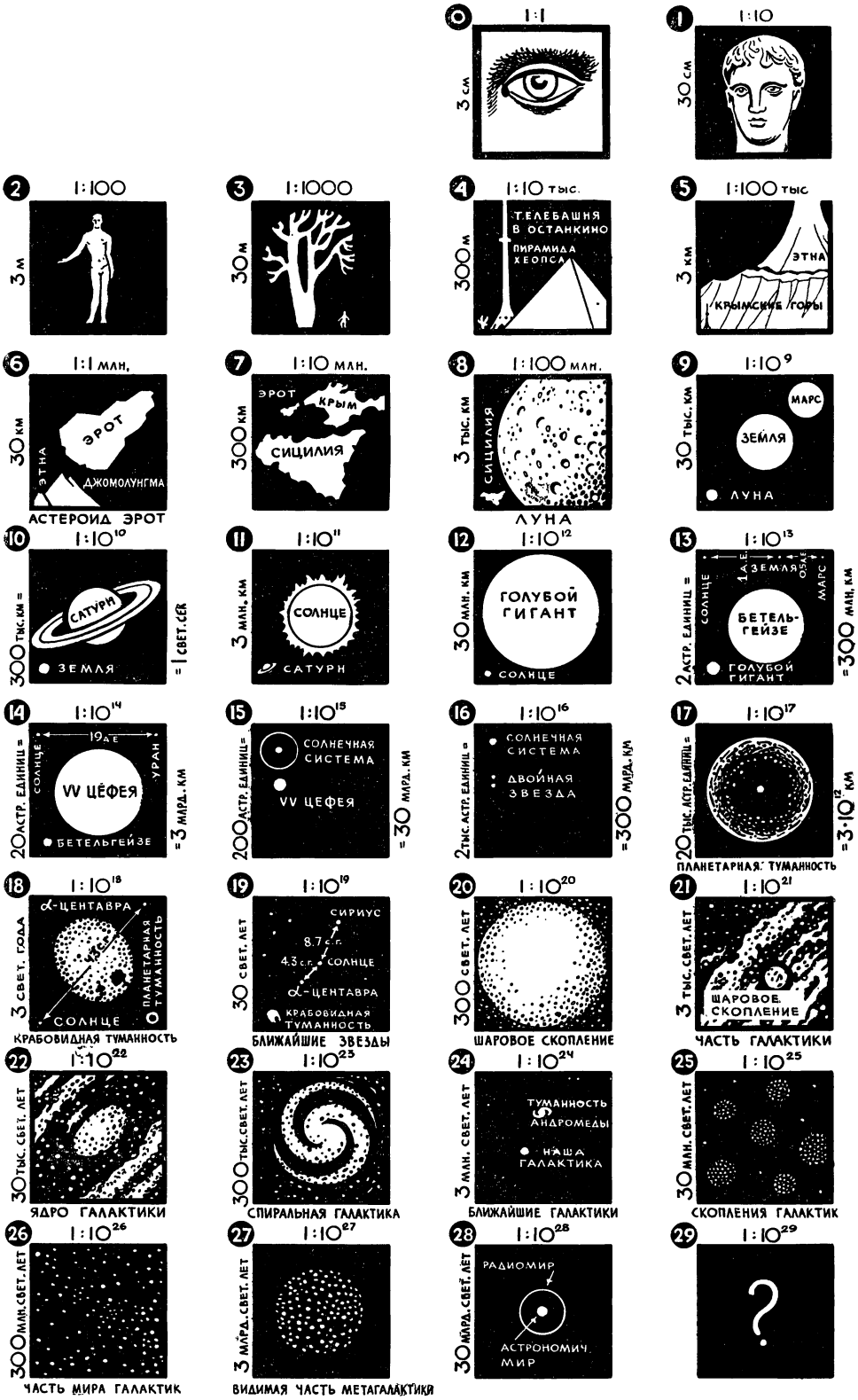
■

# РАЗБЕРЕМСЯ В РАЗМЕРАХ

В этом томе и в других томах энциклопедии вы не раз читали о бесконечно большом и бесконечно малом, о гигантском и крошечном: о звездах-карликах и гигантских водорослях, о гигантских белковых молекулах и ничтожных пылинках, о громадных космических просторах, мельчайших вирусах и о невообразимо маленьких электронах. Как все это сопоставить друг с другом? Что больше чего и во сколько раз?

Давайте наведем порядок. Расставим все предметы мира по ранжиру. Вот серия рисунков. На исходном рисунке — нулевом — глаз человека, он будет нашим масштабом. Масштаб принято выражать отношением размера изображения к действительному размеру. Мы условно примем, что нулевой рисунок изображен в масштабе 1:1. С человека мы начали не потому, что человек центр Вселенной, а потому, что мы сами—люди, мы изучаем природу, чтобы использовать ее в своих интересах, вот и примеряем все на свете к себе. А оценку размерам производит именно глаз.

На рисунке 1 масштаб уменьшен в десять раз (1:10) — здесь голова человека. На рисунке 2 — весь человек. Его линейный размер примерно в 100 раз больше линейного размера глаза. Масштаб рисунка 1:100. На рисунке 3 масштаб — 1:1000, человек еще виден, но с трудом уместилось дерево средних размеров. На рисунке 4 масштаб снова уменьшен в десять раз (1:10 000): тут и дерево еле разглядишь, зато поместилось одно из самых массивных сооружений человека — египетская пирамида. А телевизионная башня, та, что строится в Москве у Останкинского пруда, не поместилась целиком, верхушка ее вышла за обрез.



Принцип ясен: от рисунка к рисунку масштаб уменьшается в десять раз (на один порядок), и в поле зрения попадают предметы в десять раз крупнее.

На рисунке 5 изображены Крымские горы и вулкан Этна. На рисунке 6 — гора Джомолунгма и самая маленькая планета солнечной системы — Эрот. На рисунке 7— Крымский полуостров и остров Сицилия. На рисунке 8— Луна почти целиком. На рисунках 9 и 10 — планеты. На рисунке 11 — Солнце, затем звезды-гиганты, но для рисунка 15 звезду не подберешь, на нем изображена наша солнечная система.

Дальнейшие рисунки занимают системы небесных тел: двойные звезды, звездные скопления вплоть до самого громадного — гигантской спиральной галактики вроде нашего Млечного Пути (рис. 23). Затем — расстояние до ближайших галактик, скопления галактик и все, что видно с помощью сильнейших телескопов. Все это называется видимой частью Метагалактики.

Радиотелескопы помогают проникнуть несколько дальше оптических зеркальных телескопов, но и радиомир умещается на рисунке 28, масштаб которого $1:10^{28}\cdot10^{28}$ — это единица с двадцатью восемью нулями. Что следует изобразить на рисунке 29, наука пока еще не знает.

Вернемся к глазу человека и проделаем путешествие в противоположном направлении — в мир малых величин. На этот раз мы от рисунка к рисунку будем увеличивать масштаб в 10 раз. На рисунке 1 веслоногий рачок циклоп, который раз в десять меньше глаза. Для рисунка 2 уже не нашлось предмета, видимого невооруженным глазом, здесь пришлось поместить амебу. Между этими рисунками проходит важный порог, который человечество не могло переступить до конца XVII в. — граница возможностей человеческого зрения. Рачков наши предки видели все, амебу до Левенгука не видел никто. Микроскоп позволил перейти этот барьер, показал нам мир клеток: одноклеточных животных и клеток организма, изображенных на рисунках 3 и 4. И снова барьер — почти сто лет наука топталась перед ним, — барьер дифракции. Нельзя с помощью световых лучей видеть то, что меньше длины их волны. Только перейдя от видимых лучей к невидимым, от световых волн к электронным, наука продвинулась в середине нашего века еще на одну клетку, сфотографировала то, что изображено на рисунках: 5 — вирус и 6 — большую молекулу. Между рисунками 6 и 7 проходит барьер сегодняшнего видения. Дальнейшие рисунки составлены на основании косвенных данных, добытых опытами и приборами, которые не дают изображение, а измеряют свойства: электрические, магнитные, энергию, скорость, силу удара, прочность и т. д.

На рисунке 8 условно изображен атом: в центре — положительное ядро, на периферии — орбиты отрицательных электронов. У ученых нет уверенности, что электроны движутся именно по таким орбитам, да и размеры ядра на самом деле значительно меньше. Его надо было бы изобразить мельчайшей точечкой.

Для рисунков от 9 до 12 нет соответствующих предметов.

Ядро атома, изображенное как совокупность нуклонов на рисунке 13, в 100 тыс. раз меньше самого атома.

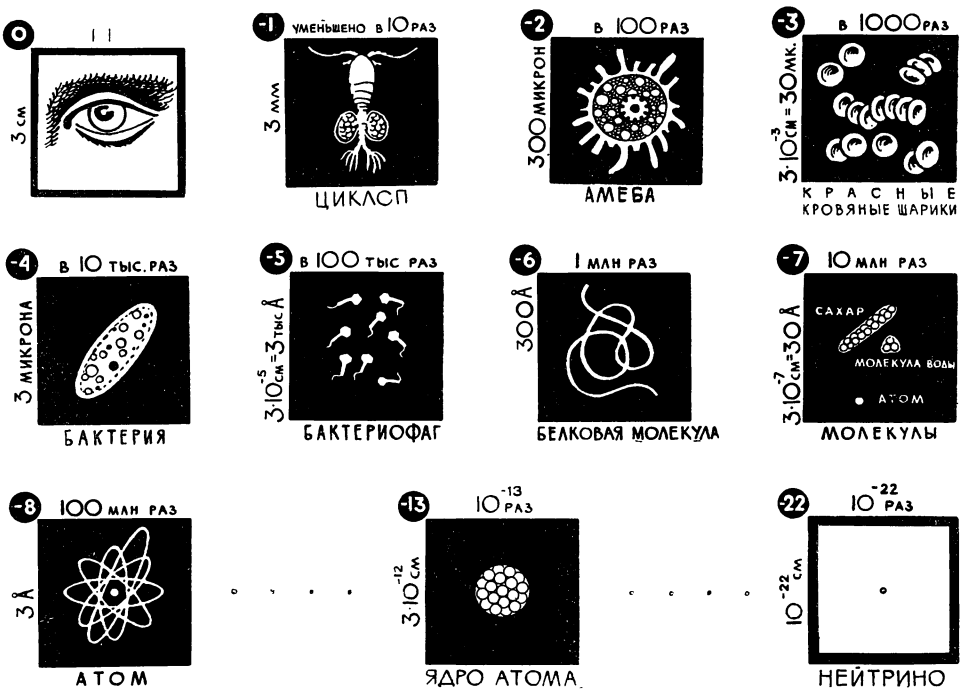
Мы не изображаем электроны, мезоны и другие элементарные частицы потому, что их строение еще неизвестно достоверно, а следовательно, и размеры их могут быть лишь весьма предположительными.

Мы ограничиваемся рисунком 22. На нем изображено сечение самой загадочной из известных элементарных частиц — нейтрино. Впрочем, нельзя утверждать, что у нейтрино именно такие размеры. Выяснено лишь, что в таком сечении эта частица взаимодействует с веществом.

Все эти рисунки наглядно показывают размерные соотношения предметов. Например, бактерии и бактериофаги изображены на смежных рисунках — это значит, что бактерия в десятки раз больше бактериофага. Вирус (бактериофаг) во столько же раз меньше человека, во сколько раз человек меньше Земли. Галактика больше Солнца на 12 порядков, на столько же Солнце больше циклопа.

Ряды этих рисунков полезны не только для сравнений, нужны они и для размышлений о природе в целом, они подсказывают недоуменные «почему», на которые наука не всегда способна ответить.

Главное вы уже заметили. От рисунка к рисунку нам приходилось менять не только масштаб, но и тему. Люди бывают разного роста, но нет ни одного карлика, который мог бы втиснуться в рисунок 1, ни одного



гиганта, который не выглядел бы жалкой черточкой на рисунке 3. И на этих рисунках мы должны были изобразить не людей, а что-то другое: дерево, глаз. Может, следовало повсюду изобразить животных? Да, вместо дерева можно было бы нарисовать, например, кита, но для рисунка 4 не нашлось бы зверя, достаточно крупного, чтобы стоять рядом с пирамидой. А для рисунка 5 не нашлось бы и здания подходящего, по величине сравнимого с горами. У всякого класса предметов оказались свои размеры — от сих и до сих.

Особенно резко видны границы, если мы расположим предметы не по размерам, а по массе, как это сделано на таблице, помещенной на этой и следующей страницах. Так как масса связана с объемом, а объем пропорционален кубу размера, здесь каждая ступень означает увеличение не в 10, а в 1000 раз. Нулевая ступень принадлежит человеку, здесь — предметы с массой от 1 *кг* до 1 *т*. И глядите, что получается: для звезд — две ступеньки, для молекул — две, для атомов — одна, для живых существ — девять ступенек, но у каждого типа своя ступенька, звери — на трех ступеньках, птицы — на двух, бактерии — на двух, но гораздо ниже и т. д.

В общем-то таблица масс очень сходна с таблицей линейных размеров. Впрочем, есть и различия. Например, в линейных размерах Солнце и солнечная система отличаются резко — на четыре порядка. На таблице же масс Солнце и солнечная система сливаются, потому что массы их почти одинаковы. В Солнце сосредоточено 99,8% массы всей системы. То же и с атомом. На таблице масс атом и атомное ядро слились, потому что в ядре сосредоточено более 99,9% массы, а в ряду рисунков они разделены четырьмя порядками, так как по сравнению с атомом ядро—все равно что рачок по сравнению с деревом.

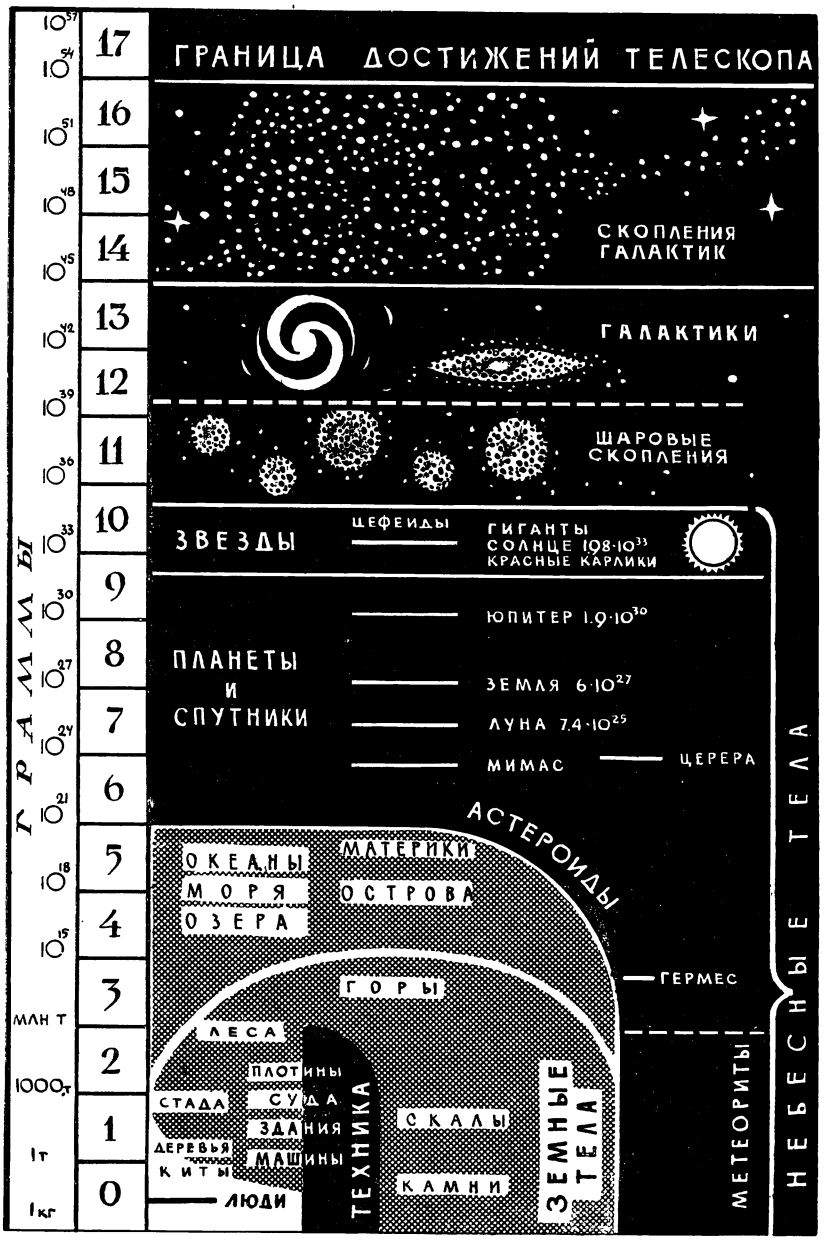
Только не делайте скороспелый вывод, что атом — крохотная планетная система. Они сходны, но и несходны, как и все в природе сходно и несходно. Сходны силами, их образующими: электростатическим притяжением в атоме, гравитационным тяготением в космосе. Но ядро состоит из десятков или сотен нуклонов и совсем не похоже на Солнце, сложившееся из $10^{56}$ атомов. Ничего нет общего и между планетой и электроном — частицей со свойствами волны.

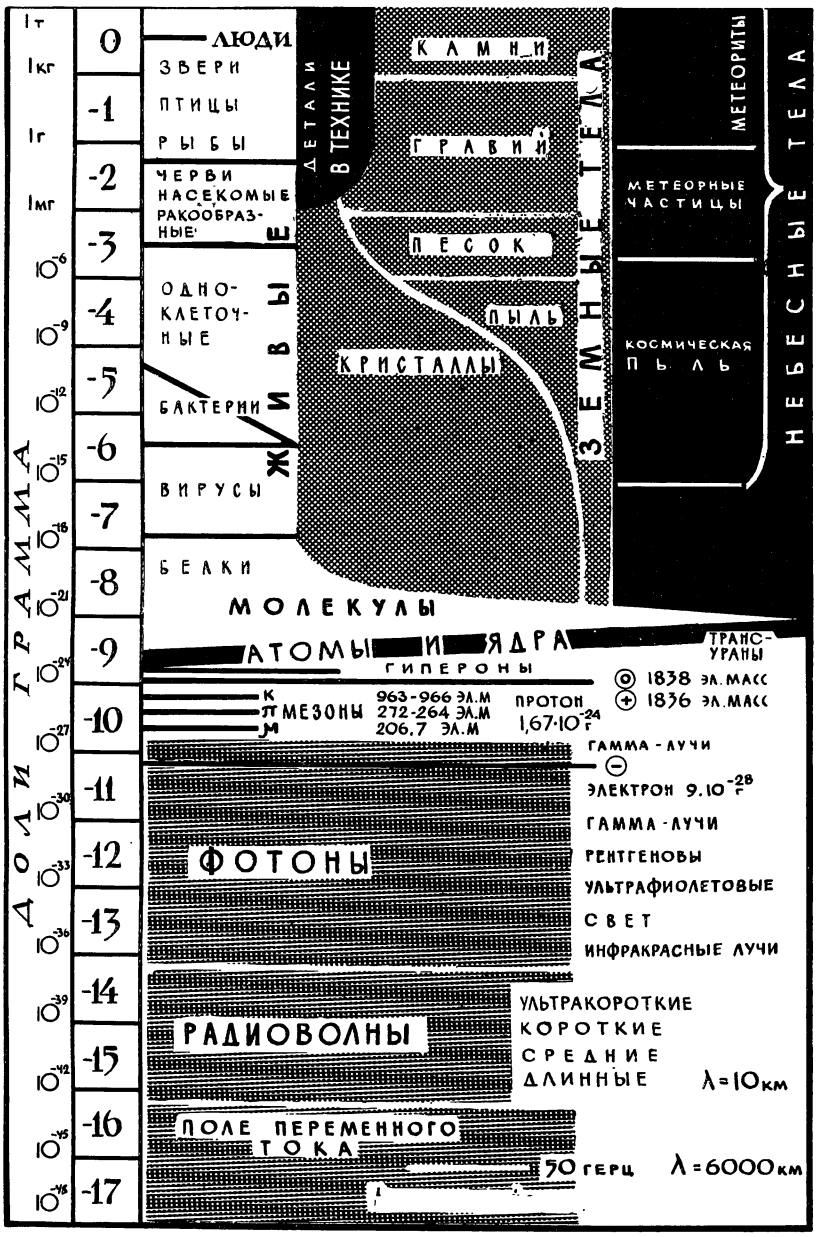
Интересно, что из несходного материала с помощью подобных сил природа может слепить внешне сходные предметы.

Рассматривая рисунки, вы заметили, наверное, что ряд гигантов оказался гораздо длиннее ряда карликов. Казалось бы, в глубины человек проникает медленнее. На таблице масс такой диспропорции нет, там человек оказался почти точно в середине: 17 ступеней вверх, 17 — вниз.

Произошло это за счет самого низа, где на таблице масс несколько ступеней занимают электромагнитные волны. На рисунках их нет, потому что нет ясности, каков размер волны. У волн есть длина — расстояние между двумя гребнями, но по отношению к фотонам нет никакой уверенности, что длину там можно понимать в прямом размерном смысле, что там вообще есть гребни и расстояние между ними.

Но даже если бы мы изобразили на рисунках длину волн, не размышляя, что это такое, получился бы






У каждой группы предметов — свои этажи, свои квартиры. И соответственно по разным этажам и квартирам распределяются науки. На самом верху, под «небом», работает астрономия: на средних ступенях — сфера действия биологии и геологии. Всего пять ступеней — две вверх и две вниз от человека — завоевала техника. Сооружения и изделия наших рук все еще меньше гор и больше песчинок.

Самый низ таблицы—фундамент, основу основ—изучают физика и химия, причем владения химии начинаются не в самом низу, а только на минус девятой ступени, где из атомов образуются сложные сооружения — молекулы. Одна ступень принадлежит химии, но уже на следующей ступени из молекул начинают возникать еще более сложные сооружения: в мире неживого — кристаллы, в мире живого — вирусы. Но так как все вещества и все существа состоят из химических соединений, так как и в живой и в неживой природе идут химические процессы, химия простирает свое влияние на много ступеней вверх: через биохимию — на живое и через геохимию — на неживое. Влияние могущественной химии заканчивается только на десятой ступени — в мире горячих солнц. Там из-за высокой температуры молекулы разрушаются. Молекулам конец — и химии конец.

Сфера влияния физики еще обширнее. Физика царит на самых нижних ступенях. Фундамент мира, кирпичики, из которых построено все (элементарные частицы и атомы), изучает физика. С миром жизни физика связана через биофизику, с миром неживых тел — через геофизику, с миром небесных тел — через астрофизику.

С физикой мы встречаемся и на семнадцатой нижней ступени, и на семнадцатой верхней.

Естественно, возникает вопрос: а что же на следующих ступенях— на восемнадцатой, девятнадцатой, двадцатой? Надо ли продолжать таблицу вверх и вниз до бесконечности? Что такое эта таблица: схема строения природы или схема наших знаний о ближайшем участочке природы?

Ученые не одинаково отвечают на эти вопросы. Астрономы, ведающие верхом таблицы, думают, что ее можно будет продолжить вверх, хотя здесь мы уже подходим к границам пространства, откуда до нас может доходить свет.

Физики же, хозяева нижних ступеней таблицы, полагают, что далеко вниз продвигаться не придется, что мы уже находимся у самого дна, у основы основ материи, многообразной, но неделимой.

полнейший разнобой: чем ниже оказалась бы волна в таблице масс, тем выше в таблице объемов. Ведь у волн чем меньше масса, тем больше длина. Волны света оказались бы на уровне бактерий, волны инфракрасные — возле клеток и амеб, радиоволны рядом с деревьями и башнями... Лишнее доказательство того, что понятия, выработанные для мира, который окружает человека, не подходят для микровеличин. Видимо, масса в мире волн — нечто побочное.

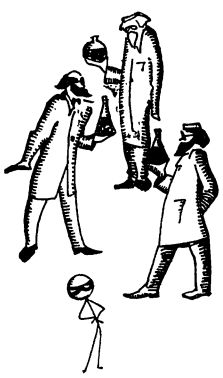
Окинем еще раз взглядом таблицу масс. Итак, на одной ступени звезды, на другой — планеты, полторы ступени заняли молекулы, одну ступень — атомы.

# БИОГРАФИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

У каждого химического элемента своя биография. Есть элементы, «жизненные пути» которых можно очень точно проследить со дня их «рождения» — открытия. Начало биографий других элементов теряется в далеких тысячелетиях. Открытие одних элементов ни у кого не вызывало сомнений; открытие других пришло после длинной цепи ошибок и разочарований.

Давайте сделаем перепись «населения» периодической системы элементов. Сто четыре химических элемента расположены в клетках таблицы Менделеева. Сто лет назад их было всего 63. А еще столетием ранее ученые весьма нечетко представляли себе, что же следует считать химическим элементом. В качестве элементов фигурировали подчас различные сложные вещества, соединения. Например, известь, кремнезем, магнезия считались самостоятельными элементами. И только в 1789 г. французский химик Лавуазье провел четкую грань между элементом и соединением.

Но что же следует понимать под открытием химического элемента? Быть может, выделение элемента в чистом виде? Нет. Половина элементов периодической системы первоначально была известна в виде соединений: проходило немало времени, прежде чем ученые находили способы извлекать их из этих соединений. Так, соединение фтора — плавиковая кислота — стало известно в 1771 г. Затем ученые установили, что водород в кислоте соединен с незнакомым еще элементом **фтором**. И фтор вошел в список химических элементов. Но чтобы получить свободный фтор — самый активный неметалл, — потребовались десятилетия. Только в 1886 г. француз Анри Муассан получил газообразный фтор. Что же считать истинной датой открытия фтора?



А вот другой рассказ об элементе, которому суждено было «родиться» по крайней мере трижды. Это популярный теперь и знакомый всем **уран**. Первооткрывателем его считают немца Мартина Клапрота (1789). Спустя полвека француз Эжен Пелиго выяснил, что его немецкий коллега держал в руках не элемент уран, а всего лишь окись урана. Пелиго получил чистый металл, но свойства его и атомный вес определил неверно. Когда Менделеев строил периодическую систему, он убедился, что уран по своему атомному весу должен стоять в третьей группе, но его свойства к этой группе не подходят. Веря в справедливость открытого им закона, Менделеев сделал вывод: атомный вес урана должен быть значительно больше и элемент следует поместить в шестую группу. Так уран стал замыкающим в таблице элементов. Это было как бы его третьим рождением. Правда, Мартин Клапрот не потерял право называться первооткрывателем урана.

В 1912 г. при раскопках древнеримского города Помпеи была найдена фреска из мозаики. Анализ краски в этой фреске показал слабую радиоактивность. Химики выяснили причину радиоактивности: в состав красок входил уран (около 1% по весу). А позднее было доказано, что римляне знали окислы урана, применяли их для окраски стекол и керамики. Закономерно предположить, что именно здесь следует искать истоки биографии урана.

Открытие 104 химических элементов — это сто четыре незыблемые истины. Многие теории и гипотезы под давлением новых фактов могут меняться, могут быть отвергнуты вовсе. Но существование 104 элементов доказано со всей возможной научной строгостью. Можно синтезировать новые сверхтяжелые элементы, закрыть старые нельзя. Для науки наших дней—это аксиома, хотя бы потому, что в таблице Менделеева все клетки в старых границах — от водорода до урана — заполнены.

Это не было аксиомой в XIX в. и в течение почти всей первой половины XX в. Рядом со списком 104 химических элементов история науки хранит другой список, куда более длинный, — перечень ложных открытий элементов, печальный и курьезный реестр ошибок.

В 1821 г. шведский химик Иенс Берцелиус открыл новый элемент — **торий**. Никто из ученых не усомнился в истинности открытия. Усомнился сам автор. Сомнение оказалось полезным. То, что Берцелиус принял за торий, представляло собой фосфорнокислую соль уже известного элемента **иттрия**. Правда, Берцелиус в 1828 г. все же сумел обнаружить истинный торий. А минерал, послуживший источником ошибки, назвал к с е н о т и м о м (по-гречески это означает чужая честь).

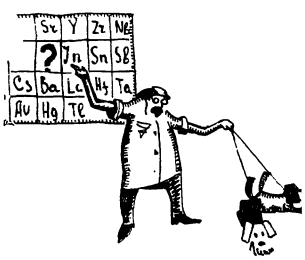
Не избежал ошибок и знаменитый английский ученый Вильям Крукс. Он провозгласил открытие целого класса так называемых метаэлементов. А немец Рихард Свинне с подобным же «успехом» открыл тяжелые трансурановые элементы... в образцах космической пыли, собранных в Гренландии известным полярным путешественником Норденшельдом.

Есть среди элементов такие, которые сначала были открыты в атмосфере Солнца и звезд, а уже потом на Земле. Это — **гелий** и **технеций**. О существовании некоторых элементов ученые могут судить лишь по косвенным признакам. Это тяжелые трансурановые элементы. Есть, наконец, и такие, которые вряд ли удастся выделить в свободном виде, в мало-мальски весомом состоянии. Это — **астат** и **франций**. Но все эти элементы, как и остальные представители периодической системы,— полноправные химические элементы, в материальности которых никто не сомневается.

Авторы открытий элементов в большинстве случаев известны и признаны. Правда, французы и немцы до сих пор молчаливо остаются при своем мнении относительно названия элемента 71 — последнего редкоземельного элемента: **лютеций** или **кассиопей**?

Наука существует тысячелетия, но большинство элементов периодической системы обнаружено только в последние двести лет. Почему один и тот же элемент порой «открывался» дважды, трижды, четырежды и более раз? Одни элементы были известны с глубокой древности, а другие, которых в земной коре ничуть не меньше, удалось найти сравнительно недавно. Почему, наконец, сам факт открытия химических элементов — это всего лишь счастливое стечение обстоятельств, событие целиком случайное?

Начнем с ответа на последний вопрос. После открытия периодического закона эта случайность была сведена к минимуму. Периодическая система, предсказывая свойства неизвестных элементов, как бы позволяла программировать их поиски. Вспомним, как блистательно оправдались предсказания Менделеева о свойствах «экабора», «экаалюминия», «экасилиция»— будущих **скандия**, **галлия** и **германия**. Свойства и источники для поисков доброго десятка неоткрытых элементов были предугаданы на основании периодической системы. Немецкие химики Вальтер и Ида Ноддак еще до открытия **рения** знали с помощью таблицы Менделеева такие подробности его свойств, как если бы он уже был найден и достаточно хорошо изучен. Американский физик Глен Сиборг вместе с сотрудниками синтезировал большинство трансурановых элементов. И в этих открытиях периодическая система была им незаменимой помощницей.




Но ведь до того, как появилась периодическая система, было открыто 63 химических элемента — почти $^2/_3$ известных теперь. И уж открытия этих-то элементов, должно быть, наверняка случайны.

И да и нет! Да потому, что ученые чаще всего неожиданно наталкивались на следы неизвестного элемента в каком-нибудь минерале или соединении. Нет потому, что история открытия химических элементов — это не какая-нибудь оторванная от жизни, ни с чем не связанная история. Она неразрывна с историей всей химии. Химия год за годом совершенствовала свои методы исследования, делала их более отточенными и четкими. Возникала основа для открытия новых элементов, которые для прежних методов оставались незамеченными.

Несколько химических элементов было известно на заре нашей цивилизации. И люди знали эти элементы в свободном виде. Более того, подавляющее большинство этих элементов в земной коре встречается сравнительно редко (см. табл. на стр. 539, графу «Распространенность в природе»).

Прежде всего следует сказать об **углероде**. Быть может, это первый химический элемент, с которым познакомился человек. Ведь угли костра — это тот же самый углерод.

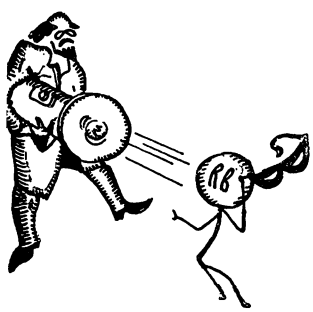
Затем несколько металлов. Среди них прежде всего золото. Знакомство человека с **золотом** произошло, видимо, 6—7 тыс. лет тому назад. В те отдаленные времена люди знали еще **медь** и **серебро**. **Олово**, **свинец**, **цинк** и **сурьма** также принадлежат к элементам древности. Употребление **железа** положило начало железному веку. И, наконец, **сера**, упоминания о

которой встречаются в старинных письменных источниках. Все это древнейшие химические элементы — разные по своим свойствам, по распространенности в земной коре. Одна черта у них общая. Кроме железа и цинка, они встречаются в самородном состоянии, в чистом виде. Эти элементы выделяли из руд сравнительно легко даже примитивными способами. Некоторые ученые считают, что человек познакомился с метеоритным железом прежде, чем научился выплавлять его из минералов.

Но есть на Земле еще шесть элементов (платиновые металлы), которые встречаются в самородном состоянии: **рутений**, **родий**, **палладий**, **осмий**, **иридий** и **платина**. Почти все они были открыты только в прошлом веке. Их месторождения крайне редки. Они очень похожи друг на друга свойствами и потому встречаются вместе. И чтобы разобраться в этом спутанном клубке платиновых металлов, понадобилось все искусство химического анализа.

Примитивные методы химического анализа знали еще с давних пор и алхимики. Разлагая всевозможные минералы и соединения, они, бесспорно, держали в своих руках несколько элементов, открытых гораздо позже. Только два элемента — **мышьяк** и **висмут** — были с достоверностью обнаружены в средние века. Эти элементы действительно были открыты совершенно случайно.

Когда же способы качественного и количественного химического анализа стали научными методами и химики научились определять, из каких элементов состоит тот или иной минерал, тогда-то стали возможными многочисленные открытия новых химических элементов. По крайней мере три десятка неизвестных ранее простых веществ были открыты с помощью методов аналитической химии: **литий** и **бериллий**, **титан** и **ванадий**, **хром** и **молибден**, **ниобий** и **тантал**. Это произошло за каких-то сто лет: вторая половина XVIII — первая половина XIX в.



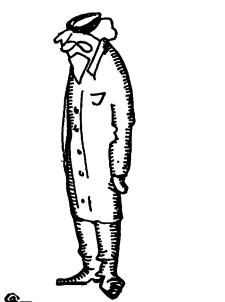
Химики начали изучать газы: так родилась новая область химии — пневматическая химия. Загадки невидимой земной атмосферы постепенно разгадывались. Воздух представился людям в виде смеси газов — газообразных элементов. Новый метод исследования дал возможность открыть новые элементы: **водород**, **азот**, **кислород**. Кстати, чем не парадокс: кислород — самый распространенный элемент на Земле, а стал известен человечеству только в 70-х годах XVIII в. Вот еще пример закономерной случайности!

Соединения **натрия**, **калия**, **магния**, **кальция** люди использовали с давних времен. Но в свободном виде эти элементы предстали перед учеными лишь в 1807—1808 гг. Знаменитый английский химик Гемфри Дэви применил новый метод исследования — электролиз расплавленных солей. И на катоде заблестели крупинки щелочных и щелочноземельных металлов.

Открытый в 1860 г. спектральный анализ позволил еще дальше продолжить список известных химических элементов. Яркие спектральные линии сигнализировали о присутствии в земных минералах **рубидия** и **цезия**, **индия** и **таллия**.

После того как Менделеев разработал периодическую систему элементов, стало ясно, какие еще элементы предстоит обнаружить ученым.

В 1895 г. В. Рентген открыл неизвестные лучи. Применение рентгеновских лучей на практике позволило разработать метод рентгеноспектрального анализа. Итог: два новых элемента — **гафний** и **рений**.



В 1896 г. Анри Беккерель обнаружил явление радиоактивности. Его исследование привело к открытию целой серии радиоактивных элементов: **полония** и **радия**, **актиния**, **радона** и **протактиния**.

Так одна за другой заполнялись пустовавшие клетки таблицы. И только некоторые из них, несмотря на усилия ученых, оставались «незаселенными» — клетки 43, 61, 85, 87. И неясно было, существуют ли элементы тяжелее урана. Все эти недостающие элементы были получены искусственным путем (см. ст. «Рождение, жизнь и смерть химических элементов»).

В таблице (стр. 539) указано, кем и когда был открыт тот или иной элемент и почему он так называется. Кроме того, даны сведения о распространенности химических элементов. В геохимии величина распространенности элемента называется к л а р к (в честь американского геохимика Ф. Кларка). Например, цифра 0,01 против азота говорит о том, что земная кора содержит азот в количестве сотой доли процента по весу. Точные данные о содержании инертных газов отсутствуют.

## Кем и когда были открыты химические элементы

| Название элемента | Символ | Кто и когда открыл | Распространенность в природе | Происхождение названия |
|---|---|---|---|---|
| 1. Водород | H | Английский ученый Г. Кавендиш в 1766 г. | 0,15 | От латинского слова «гидрогениум» — рождающий воду |
| 2. Гелий | He | Обнаружили в солнечном спектре англичанин Н. Локьер и француз Ж. Жансен в 1868 г. На Земле обнаружил англичанин У. Рамзай в 1895 г. | — | От греческого слова «гелиос» — Солнце |
| 3. Литий | Li | Шведский ученый А. Арфведсон в 1817 г. | 0,0065 | От греческого слова «литос» — камень |
| 4. Бериллий | Be | Французский ученый А. Воклен в 1797 г. | $6 \cdot 10^{-4}$ | По названию минерала берилла |
| 5. Бор | B | Французские ученые Ж. Гей-Люссак и Л. Тенар в 1808 г. | $3 \cdot 10^{-4}$ | От персидского слова, означающего бура |
| 6. Углерод | C | Известен с глубокой древности | 0,1 | Латинское название «карбониум» происходит от санскритского слова «кра», что значит пылать. Русское название «углерод» введено в 1824 г. |
| 7. Азот | N | Английский ученый Д. Розерфорд в 1772 г. | 0,01 | Латинское название «нитрогениум» происходит от слова «нитрум» — селитра |
| 8. Кислород | O | Шведский ученый К. Шееле и английский Д. Пристли в 1768—1774 гг. | 47,2 | От латинского слова «оксигениум» — рождающий кислоты |
| 9. Фтор | F | В виде плавиковой кислоты получен К. Шееле в 1771 г. | 0,027 | От греческого слова «фторос» — разрушающий |
| 10. Неон | Ne | Английские ученые Д. Рэлей, У. Рамзай и М. Траверс в 1898 г. | — | От греческого слова «неос» — новый |
| 11. Натрий | Na | Английский ученый Г. Дэви в 1807 г. | 2,64 | От «едкого натра», названия щелочи |
| 12. Магний | Mg | Английский ученый Г. Дэви в 1808 г. | 2,1 | От латинского слова «магнезиа» — окись магния |
| 13. Алюминий | Al | Датский ученый К. Эрстед в 1825 г. | 8,8 | От латинского слова «алюмен» — квасцы |
| 14. Кремний | Si | Шведский ученый И. Берцелиус в 1823 г. | 27,6 | От латинского слова «лапис креманс» — кремень |
| 15. Фосфор | P | Немецкий химик Г. Брандт в 1669 г. | 0,08 | От греческих слов «фос» — свет и «феро» — несу |
| 16. Сера | S | Известна с глубокой древности | 0,09 | От санскритского слова «сира» — светло-желтый |
| 17. Хлор | Cl | Шведский ученый К. Шееле в 1774 г. | 0,045 | От греческого слова «хлорос» — зеленоватый |
| 18. Аргон | Ar | Английские ученые У. Рамзай и Д. Рэлей в 1894 г. | — | От греческого слова «аргос» — ленивый |
| 19. Калий | K | Английский ученый Г. Дэви в 1807 г. | 2,6 | От «едкого кали», названия щелочи |
| 20. Кальций | Ca | Английский ученый Г. Дэви в 1808 г. | 3,6 | От латинского слова «калькс» — известь |
| 21. Скандий | Sc | Шведский ученый Л. Нильсон в 1879 г. | $6 \cdot 10^{-4}$ | В честь Скандинавии |
| 22. Титан | Ti | Английский ученый В. Мак-Грегор в 1784 г. | 0,6 | По имени героя греческой мифологии Титана |
| 23. Ванадий | V | Шведский ученый Н. Зефстрем в 1830 г. | 0,015 | По имени древнескандинавской богини красоты Ванадис |
| 24. Хром | Cr | Французский ученый А. Воклен в 1797 г. | 0,02 | От греческого слова, означающего цвет, краска |
| 25. Марганец | Mn | Шведские ученые К. Шееле и И. Ган в 1774 г. | 0,09 | От латинского слова «магнезиа» |
| 26. Железо | Fe | Известно с глубокой древности | 5,1 | От санскритского слова «гала», обозначающего металл, руда |
| 27. Кобальт | Co | Шведский химик Г. Брандт в 1735 г. | 0,003 | По имени мифологического злого духа Кобольда |
| 28. Никель | Ni | Шведский химик А. Кронштедт в 1751 г. | 0,008 | По имени мифологического злого духа Ника |
| 29. Медь | Cu | Известна с глубокой древности | 0,01 | Латинское название меди «купрум» происходит от названия о-ва Кипр |

*Продолжение*

| Название элемента | Символ | Кто и когда открыл | Распространенность в природе | Происхождение названия |
|---|---|---|---|---|
| 30. Цинк | Zn | Открыт в средние века | 0,005 | Происходит от латинского слова, означающего бельмо или белый налет |
| 31. Галлий | Ga | Французский ученый П. Лекок де Буабодран в 1875 г. | 0,0015 | От старинного названия Франции — Галлия |
| 32. Германий | Ge | Немецкий ученый К. Винклер в 1886 г. | $7 \cdot 10^{-4}$ | В честь Германии |
| 33. Мышьяк | As | Открыт в средние века | $5 \cdot 10^{-4}$ | Русское название «мышьяк» происходит от слов «мышь» и «яд» |
| 34. Селен | Se | Шведские ученые И. Берцелиус и И. Ган в 1817 г. | $6 \cdot 10^{-5}$ | От греческого слова «селена» — Луна |
| 35. Бром | Br | Французский ученый А. Баляр в 1825 г. | $6 \cdot 10^{-4}$ | От греческого слова «бромос» — зловонный |
| 36. Криптон | Kr | Английские ученые У. Рамзай и М. Траверс в 1898 г. | — | От греческого слова «криптос» — скрытый |
| 37. Рубидий | Rb | Немецкие ученые Г. Кирхгоф и Р. Бунзен в 1861 г. | 0,031 | От греческого «рубидос» — темно-красный |
| 38. Стронций | Sr | Английские ученые А. Крофорд и Т. Хоп в 1792 г. | 0,04 | От названия минерала стронцианита |
| 39. Иттрий | Y | Финский ученый Ю. Гадолин в 1794 г. | 0,0028 | От названия шведской деревушки Иттерби, где был найден первый редкоземельный минерал |
| 40. Цирконий | Zr | Немецкий ученый М. Клапрот в 1789 г. | 0,02 | От названия минерала циркон |
| 41. Ниобий | Nb | Английский ученый Ч. Гетчет в 1801 г. | 0,001 | В честь мифологической богини Ниобеи — дочери Тантала |
| 42. Молибден | Mo | Шведский ученый К. Шееле в 1778 г. | $3 \cdot 10^{-4}$ | От названия минерала молибденит |
| 43. Технеций | Tc | Искусственно получили итальянские физики Э. Сегре и К. Перье в 1937 г. На Земле обнаружили американские ученые Б. Кенна и Т. Курода в 1961 г. | Следы | От греческого слова «технетос» — искусственный |
| 44. Рутений | Ru | Русский ученый К. К. Клаус в 1844 г. | $5 \cdot 10^{-4}$ | В честь России (от латинского «Рутениа» — Россия) |
| 45. Родий | Rh | Английский ученый В. Волластон в 1803 г. | $1 \cdot 10^{-7}$ | От греческого слова «родон» — розовый |
| 46. Палладий | Pd | Английский ученый В. Волластон в 1803 г. | $1 \cdot 10^{-6}$ | По названию астероида Паллас, открытого в 1801 г. |
| 47. Серебро | Ag | Известно с глубокой древности | $1 \cdot 10^{-5}$ | От ассирийского слова «сарпу»; символ произошел от романского названия серебра «аргентум» |
| 48. Кадмий | Cd | Немецкий ученый Ф. Штромейер в 1817 г. | 0,001 | От греческого слова «кадмейа» — цинковая руда |
| 49. Индий | In | Немецкие ученые Ф. Рейх и Т. Рихтер в 1863 г. | $1 \cdot 10^{-5}$ | От синей линии в спектре, своей окраской напоминающей цвет краски индиго |
| 50. Олово | Sn | Известно с глубокой древности | 0,004 | Латинское название «станнум» происходит от санскритского слова, означающего твердый |
| 51. Сурьма | Sb | Известна с глубокой древности | $4 \cdot 10^{-5}$ | От турецкого слова «сурьме» — чернение |
| 52. Теллур | Te | Немецкий ученый М. фон Рейхенштейн в 1782 г. | $1 \cdot 10^{-6}$ | От латинского слова «теллурис» — земля |
| 53. Йод | I | Французский ученый Б. Куртуа в 1811 г. | $3 \cdot 10^{-5}$ | От греческого слова «иодос» — фиолетовый |
| 54. Ксенон | Xe | Английские ученые У. Рамзай и М. Траверс в 1898 г. | — | От греческого слова «ксенос», означающего чужой |
| 55. Цезий | Cs | Немецкие ученые Р. Бунзен и Г. Кирхгоф в 1860 г. | $7 \cdot 10^{-4}$ | От греческого слова «цезиус» — небесно-голубой |
| 56. Барий | Ba | Шведский ученый К. Шееле в 1774 г. | 0,05 | От греческого слова «барис» — тяжелый |
| 57. Лантан | La | Шведский ученый К. Мосандер в 1839 г. | 0,0018 | От греческого слова «лантанос» — скрытый |

| Название элемента | Символ | Кто и когда открыл | Распространенность в природе | Происхождение названия |
|---|---|---|---|---|
| 58. Церий | Ce | Шведские ученые И. Берцелиус и В. Хизингер и немецкий ученый М. Клапрот в 1803 г. | 0,0045 | По названию малой планеты Церера |
| 59. Празеодим | Pr | Австрийский ученый К. Ауэр фон Вельсбах в 1885 г. | $7 \cdot 10^{-4}$ | От греческих слов «празеос» — бледно-зеленый и «дидимос»—близнец |
| 60. Неодим | Nd | Австрийский ученый К. Ауэр фон Вельсбах в 1885 г. | 0,0025 | От греческих слов «неос» — новый и «дидимос» — близнец |
| 61. Прометий | Pm | Выделили из осколков деления урана американские ученые Д. Маринский, Л. Гленденин и Ч. Кориэлл в 1947 г. В земной коре пока не обнаружен | — | В честь титана древнегреческой мифологии Прометея |
| 62. Самарий | Sm | Французский ученый П. Лекок де Буабодран в 1879 г. | $7 \cdot 10^{-4}$ | По названию минерала самарскита |
| 63. Европий | Eu | Французский ученый Е. Демарсей в 1901 г. | $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ | В честь Европы |
| 64. Гадолиний | Gd | Французский ученый П. Лекок де Буабодран в 1886 г. | 0,001 | По имени финского химика Ю. Гадолина, открывшего иттрий |
| 65. Тербий | Tb | Шведский ученый К. Мосандер в 1843 г. | $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ | По названию шведской деревушки Иттерби |
| 66. Диспрозий | Dy | Французский ученый П. Лекок де Буабодран в 1886 г. | $4{,}5 \cdot 10^{-4}$ | От греческого слова «диспрозитос»— труднодоступный |
| 67. Гольмий | Ho | Шведский ученый П. Клеве в 1879 г. | $1{,}3 \cdot 10^{-4}$ | В честь Стокгольма (старинное название «Гольмиа») |
| 68. Эрбий | Er | Шведский ученый К. Мосандер в 1843 г. | $4 \cdot 10^{-4}$ | По названию шведской деревушки Иттерби |
| 69. Тулий | Tu | Шведский ученый П. Клеве в 1879 г. | $8 \cdot 10^{-5}$ | От «Туле» — названия легендарной страны на севере Скандинавии |
| 70. Иттербий | Yb | Французский ученый Ш. Мариньяк в 1878 г. | $3 \cdot 10^{-4}$ | По названию шведской деревушки Иттерби |
| 71. Лютеций | Lu | Французский ученый Ж. Урбэн в 1907 г. | — | В честь Парижа (древнее название «Лютециа») |
| 72. Гафний | Hf | Датский ученый Д. Костер и венгерский Г. Хевеши в 1923 г. | $3{,}2 \cdot 10^{-4}$ | В честь Копенгагена (старинное название «Гафниа») |
| 73. Тантал | Ta | Шведский ученый А. Экеберг в 1802 г. | $2 \cdot 10^{-4}$ | В честь древнегреческого мифологического героя Тантала |
| 74. Вольфрам | W | Шведский ученый К. Шееле в 1781 г. | $1 \cdot 10^{-4}$ | От названия минерала вольфрамита |
| 75. Рений | Re | Немецкие ученые И. и В. Ноддак и О. Берг в 1925 г. | $1 \cdot 10^{-7}$ | В честь реки Рейна |
| 76. Осмий | Os | Английский ученый С. Теннант в 1803 г. | $5 \cdot 10^{-6}$ | От греческого слова «осмэ» — запах |
| 77. Иридий | Ir | Английский ученый С. Теннант в 1804 г. | $1 \cdot 10^{-7}$ | От греческого слова «иридис» — радуга |
| 78. Платина | Pt | Обнаружена в XVI в. | $5 \cdot 10^{-7}$ | По названию реки Платино дель Пино в Колумбии |
| 79. Золото | Au | Известно с глубокой древности | $5 \cdot 10^{-7}$ | Латинское название «аурум» происходит от Авроры, что означает утренняя заря |
| 80. Ртуть | Hg | Известна с глубокой древности | $7 \cdot 10^{-6}$ | Происхождение названия неясно. Латинское название «гидраргирум» — от греческих слов «гидрос» — вода и «аргерос» — серебро |
| 81. Таллий | Tl | Английский ученый В. Крукс в 1861 г. | $3 \cdot 10^{-4}$ | От греческого слова «таллос» — молодая зеленая ветвь |
| 82. Свинец | Pb | Известен с глубокой древности | 0,0016 | Происхождение названия неясно |
| 83. Висмут | Bi | Открыт в средние века | $2 \cdot 10^{-5}$ | От старонемецкого слова, означающего белый металл |
| 84. Полоний | Po | Французские ученые М. и П. Кюри в 1898 г. | $3 \cdot 10^{-14}$ | В честь Польши |

*Продолжение*

| Название элемента | Символ | Кто и когда открыл | Распространенность в природе | Происхождение названия |
|---|---|---|---|---|
| 85. Астат | At | Искусственно получили в 1940 г. ученые Э. Сегре, В. Корсон и В. Маккензи. Обнаружили на Земле австрийские ученые Карлик и Бернерт в 1943 г. | Следы | От греческого слова «астатос» — неустойчивый |
| 86. Радон | Rn | Английский ученый Э. Резерфорд в 1900 г. | $7 \cdot 10^{-16}$ | От элемента радия |
| 87. Франций | Fr | Французский ученый М. Перей в 1939 г. | Следы | В честь Франции |
| 88. Радий | Ra | Французские ученые М. и П. Кюри в 1898 г. | $1 \cdot 10^{-10}$ | От латинского слова «радиус» — луч |
| 89. Актиний | Ac | Французский ученый А. Дебьерн в 1899 г. | $3 \cdot 10^{-14}$ | От греческого слова «актис» — луч |
| 90. Торий | Th | Шведский ученый И. Берцелиус в 1828 г. | $8 \cdot 10^{-4}$ | В честь Тора — бога скандинавской мифологии |
| 91. Протактиний | Pa | Немецкие ученые О. Ган и Л. Мейтнер и английские ученые Ф. Содди и А. Крантон в 1917 г. | $3 \cdot 10^{-4}$ | От греческих слов «протос» и «актис» — первый луч |
| 92. Уран | U | Немецкий ученый М. Клапрот в 1789 г. | $3 \cdot 10^{-4}$ | По названию планеты Уран |
| 93. Нептуний | Np | Искусственно получили американские ученые Макмиллан и Абельсон в 1940 г. Обнаружен в земных минералах в 1952 г. | Следы | По названию планеты Нептун |
| 94. Плутоний | Pu | Искусственно получили американские ученые Сиборг, Макмиллан, Кеннеди и Валь в 1940 г. В земных минералах обнаружен в 1952 г. | Следы | По названию планеты Плутон |
| 95. Америций | Am | Искусственно получили американские ученые Сиборг, Джеймс и Морган в 1944 г. | — | В честь Америки |
| 96. Кюрий | Cm | Искусственно получили американские ученые Сиборг, Джеймс и Гиорсо в 1944 г. | — | В честь Марии и Пьера Кюри |
| 97. Берклий | Bk | Искусственно получили американские ученые Томпсон, Гиорсо и Сиборг в 1949 г. | — | По названию американского города Беркли |
| 98. Калифорний | Cf | Искусственно получили американские ученые Томпсон, Стрит, Гиорсо и Сиборг в 1950 г. | — | По названию американского штата Калифорния |
| 99. Эйнштейний | Es | Искусственно получен группой американских ученых во главе с Г. Сиборгом в 1955 г. | — | В честь физика А. Эйнштейна |
| 100. Фермий | Fm | Искусственно получен американским ученым Г. Сиборгом и др. в 1955 г. | — | В честь физика Э. Ферми |
| 101. Менделевий | Md | Искусственно получен американским ученым Г. Сиборгом и др. в 1955 г. | — | В честь Д. И. Менделеева |
| 102. Название окончательно не дано | | Искусственно получен группой советских ученых во главе с Г. Н. Флеровым в 1962 г. | — | — |
| 103. Лоуренсий | Lw | Искусственно получен группой американских ученых во главе с Г. Сиборгом в 1962 г. | — | В честь Э. Лоуренса — изобретателя циклотрона |
| 104. Название пока не дано | | Искусственно получен группой советских ученых во главе с Г. Н. Флеровым в 1964 г. | — | — |

# ВАЖНЕЙШИЕ ОТКРЫТИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ И ХИМИИ

**40 000 лет до н. э.** Первобытный человек начал применять первую химическую реакцию — научился добывать огонь и пользоваться им.

**3000 лет до н. э.** Человек научился добывать бронзу и применять ее.

**2500—2000 лет до н. э.** На юге Вавилонии изобретены весы.

**2000 лет до н. э.** Открыт способ получения железа из руды.

**1500 лет до н. э.** В Египте научились добывать соду, получать из золы поташ и варить стекло.

**VI в. до н. э.** Изучены основные свойства магнитного камня. **Платон, Сократ.**

Открыто соотношение чисел в гармоническом интервале звуков. **Пифагор Самосский.**

**V в. до н. э.** Первые философские суждения об атомистическом строении тел. **Левкипп и Демокрит.**

Открыты законы о прямолинейном распространении света и о его отражении от зеркал. **Эвклид.**

**IV в. до н. э.** Философское обобщение сведений о различных явлениях природы. Первый научный поиск связи между ними. **Аристотель.**

Первая гипотеза о природе звука и явлении эхо. **Аристотель.**

**III в. до н. э.** Открыта закономерность: тело теряет в весе при погружении в жидкость. **Архимед.**

Открыт центр тяжести тел; найдены условия равновесия тел. **Архимед.**

Изучены свойства зажигательных стекол. **Архимед.**

**I в. до н. э.** В поэме «О природе вещей» изложена материалистическая атомистическая картина мира. **Лукреций Кар.**

**II в.** Исследовано преломление света на границе двух сред. **Клавдий Птолемей.**

Изобретен прототип паровой турбины. **Герон Александрийский.**

Открыт способ изготовления бумаги. **Чай-Лунь.**

**VIII в.** Возникло учение об алхимии.

Описаны методы получения азотной кислоты. **Джабир ибн-Хайян.**

**1445.** Вышла в свет первая печатная книга.

**1536.** Возникновение ятрохимии — науки о приготовлении лекарств. **Парацельс.**

**XVI в.** Изобретено устройство, сохраняющее неизменным положение тела в пространстве. **Д. Кардано.**

**1543.** Создана гелиоцентрическая система космогонии. **Н. Коперник.**

**1583.** Доказано, что при малых отклонениях период качания маятника не зависит от амплитуды. **Г. Галилей.**

**1600.** Доказано, что Земля подобна намагниченному шару. **У. Гильберт.**

Открыты электрические свойства янтаря у различных веществ. **У. Гильберт.**

**1610.** Открыты законы равноускоренного движения тел и инерции. **Г. Галилей.**

**1611.** Изобретена телескопическая труба прямого зрения. **И. Кеплер.**

**1637.** Объяснена физическая природа радуги. **Р. Декарт.**

Сформулирован закон о преломлении света. **В. Снеллиус.**

**1642.** Первый опыт, доказывающий давление атмосферы; впервые получено «пустое пространство». **Э. Торричелли.**

**1648.** Доказано, что давление атмосферы изменяется с высотой. **Б. Паскаль.**

Введено понятие «газ». **Я. Ван-Гельмонт.**

**1653.** Открыт гидростатический парадокс. **Б. Паскаль.**

**1654.** Опыты с большим объемом безвоздушного пространства (магдебургские полушария). **О. фон-Герике.**

**1657.** Математическое обоснование законов о качании маятника и об упругом ударе шаров. **Х. Гюйгенс.**

**1662—1679.** Исследованы упругие свойства воздуха и газов; открыта зависимость объема газов при неизменной температуре от давления. **Р. Бойль** и **Э. Мариотт.**

**1665.** Открыта дифракция света. **Ф. Гримальди.**

**1666.** Открыто цветовое деление белого света. **И. Ньютон.**

**1669.** Открыто двойное лучепреломление в кристалле исландского шпата. **Э. Бартолин.**

**1672.** Построена машина для электризации тел; обнаружено свечение электрических искр. **О. фон-Герике.**

**1675.** Первое определение скорости света. **О. Рёмер.**

**1677.** Исследована зависимость веса тел от высоты. **Р. Гук.**

Усовершенствован микроскоп. **А. Левенгук.**

**1678.** Открыта зависимость упругой силы от относительного удлинения при деформации тел. **Р. Гук.**

Предложена теория о волновой природе света. **Х. Гюйгенс.**

Вывод законов об отражении и преломлении света. **Х. Гюйгенс.**

**1683.** Закон всемирного тяготения. **И. Ньютон.**

**1684.** Предложена корпускулярная теория о природе света. **И. Ньютон.**

**1686.** Сформулированы основные законы механики: 1) закон инерции; 2) закон об изменении количества движения пропорционально приложенной движущей силе; 3) закон о равенстве действия и противодействия. **И. Ньютон.**

**1697.** Предложена гипотеза о существовании флогистона. **Г. Шталь.**

**1723.** Открыты два вида электрических зарядов и характер взаимодействия между ними. **Ф. Шарль.**

**1727.** Исследованы плавучесть и устойчивость корабля. **Л. Эйлер.**

**1728.** Скорость света измерена по углам аберрации неподвижных звезд. **Д. Брадлей.**

**1729.** Открыто, что все тела делятся на проводящие и непроводящие электричество. **С. Грей.**

**1745.** Изобретена «лейденская банка» — устройство, накапливающее электрические заряды. **Э. Клейст** и **П. Мушенбрук.**

**1747.** Изобретен громоотвод. **Б. Франклин.**

Наэлектризованные тела разделены на положительно и отрицательно заряженные. **Б. Франклин.**

**1748.** Открыт закон сохранения массы при химических реакциях. **М. В. Ломоносов.**

Дано молекулярно-кинетическое описание природы тепла. **М. В. Ломоносов.**

Исследования атмосферного электричества. **Г. В. Рихман.**

Изобретен электроскоп — прибор для количественного измерения электрических зарядов. **Г. В. Рихман.**

**1751—1780.** Издана «Энциклопедия, или толковый словарь наук, искусств и ремесел» (35 томов), которая оказала большое влияние на развитие физики и химии. **Д. Дидро, Ж. Д'Аламбер и другие ученые — «энциклопедисты».**

**1766.** Открыт водород. **Г. Кавендиш.**

**1768—1774.** Открыт кислород. **К. Шееле** и **Дж. Пристли.**

**1773.** Разработана теория горения. **А. Лавуазье.**

**1783.** Установлено, что вода состоит из кислорода и водорода. **А. Лавуазье** и **Ж. Мёнье.**

**1784.** Изобретены крутильные весы. **Ш. Кулон.**

Построена паровая машина. **Дж. Уатт.**

**1785.** Открыт закон о взаимодействии электрических зарядов и магнитных полюсов; измерена величина силы этого взаимодействия. **Ш. Кулон.**

Открыто явление адсорбции. **Т. Е. Ловиц.**

**1787.** Установлено, что при постоянном объеме давление газа изменяется пропорционально изменению температуры. **Ж. Шарль.**

**1791.** Открыто действие электричества на мышцы и нервы препарированной лягушки; обнаружено электрическое действие на мышцы, когда их касаются соединенными между собой различными металлами. **Л. Гальвани.**

**1793.** Во Франции введена метрическая система мер.

**1798.** На крутильных весах измерена гравитационная постоянная в законе всемирного тяготения. **Г. Кавендиш.**

**1799.** Создан гальванический элемент (вольтов столб). **А. Вольта.**

**1800.** Определено понятие электродвижущей силы и ее направление. **А. Вольта.**

Исследована контактная разность потенциалов при соединении разнородных металлов. **А. Вольта.**

Открыто магнитное поле вокруг проводника с током по действию этого поля на магнитную стрелку. **Х. Эрстед.**

Исследовано явление интерференции света. **Т. Юнг.**

Объяснено возникновение цветных пятен на тонких пленках. **Т. Юнг.**

Открыто свойство электрического тока разлагать воду на кислород и водород. **У. Николсон** и **Э. Карлейль.**

**1801.** Открыт закон парциальных давлений: давление смеси газов равно сумме давлений отдельных газов. **Дж. Дальтон.**

**1802.** Исследованы свойства газа при различных температурах. **Ж. Гей-Люссак.**

Открыта электрическая дуга при коротком замыкании полюсов вольтова столба. **В. В. Петров.**

**1802—1814.** Изобретен спектроскоп. **У. Волластон.**

**1803.** Предложены первые обозначения химических элементов и химических соединений. **Дж. Дальтон.**

**1804.** Открыт закон кратных отношений — важнейший закон атомистической теории. **Д. Дальтон.**

**1805.** Создана теория о механизме электролиза. **Х. Гроттус.**

**1806.** Открыт первый каталитический процесс при получении серной кислоты, катализатор — окислы азота. **Н. Клеман-Дезорм** и **Ш. Дезорм.**

**1807.** Получены электролизом из расплавленных солей металлы натрий и калий. **Г. Дэви.**

**1808.** Определена зависимость между давлением, объемом и температурой газа, когда нет теплообмена с окружающей средой. **С. Пуассон.**

Высказана гипотеза, что атомные веса элементов кратны атомному весу водорода. **В. Праут.**

Установлен закон о постоянстве состава химических веществ. **Ж. Пруст.**

**1808—1811.** Открыта поляризация света при прохождении через кристалл и отражении от него. **Л. Малюс.**

Сформулирован закон об интенсивности поляризованного света. **Л. Малюс.**

**1811.** Определено число молекул в грамм-моле вещества. **А. Авогадро.**

**1814.** Предложены современные буквенные символы для химических элементов. **И. Берцелиус.**

Предложена первая таблица атомных весов, включающая 46 элементов. **И. Берцелиус.**

**1817.** Объяснены темные линии в спектре солнечного света. **И. Фраунгофер.**

Исследована дифракция параллельных лучей. **И. Фраунгофер.**

**1818.** Открыт первый закон фотохимии: только поглощенный телом свет вызывает в этом теле химическое действие. **Х. Гроттус.**

**1818—1827.** Доказана волновая теория света на основе явлений дифракции и поляризации. **О. Френель.**

**1819.** Сформулирован закон: произведение удельных теплоемкостей твердых элементов на их атомные веса — величина постоянная. **П. Дюлонг и А. Пти.**

**1820.** Открыт закон, определяющий напряженность магнитного поля. **Ж. Био и Ф. Савар.**

**1821.** Открыт закон, определяющий силу, действующую на проводник с током в магнитном поле. **А. Ампер.**

Открыт закон взаимодействия электрических токов. **А. Ампер.**

**1822.** Измерена скорость звука в воздухе. **Ж. Гей-Люссак, Д. Араго** и др.

**1823.** Открыта изомерия химических соединений. **Ю. Либих.**

**1824.** Открыто намагничивание железа в магнитном поле электрического тока. **Д. Араго.**
Открыто явление изоморфизма. **Э. Митчерлих.**

Открыт второй закон термодинамики. **Н. Карно.**
**1825.** Открыт бензол. **М. Фарадей.**

**1826.** Разработан способ измерения плотности паров, чтобы определять атомный вес элемента. **Ж. Дюма.**

**1827.** Открыты законы постоянного электрического тока. **Г. Ом.**

**1828.** Синтетически получено первое органическое соединение — мочевина. **Ф. Вёлер.**

**1830.** Разработан метод анализа органических соединений. **Ю. Либих.**

**1831.** Открыта электромагнитная индукция. **М. Фарадей.**

**1832.** Сформулировано правило, которое определяет направление электродвижущей силы электромагнитной индукции. **Э. Х. Ленц.**

**1833.** Сформулированы законы электролиза. **М. Фарадей.**

Электродам даны названия: положительному — анод, отрицательному — катод. **М. Фарадей.**

**1834.** Открыт основной закон термохимии — закон постоянства суммы тепла. **Г. И. Гесс.**

**1835.** Введено в химию понятие «катализ». **И. Берцелиус.**

**1837.** Открытие гальванопластики. **Б. С. Якоби.**

**1841.** Открыт закон сохранения и превращения энергии. **Р. Майер, Г. Гельмгольц и Д. Джоуль.**

Создана теория погрешностей при физических измерениях; предложены правила обработки результатов наблюдений. **К. Гаусс.**

Определен точный атомный вес углерода. **Ж. Стас и Ж. Дюма.**
**1842.** Получен из нитробензола анилин. **Н. Н. Зинин.**

**1842—1848.** Определен механический эквивалент теплоты. **Д. Джоуль.**

**1845.** Обнаружено, что в магнитном поле плоскость поляризации света вращается. **М. Фарадей.**

**1849.** Определена скорость света в воздухе. **И. Физо.**

**1850.** С помощью маятника доказано, что Земля вращается вокруг своей оси. **Ж. Фуко.**

**1851.** Предложена шкала абсолютных температур. **В. Томсон (Кельвин).**

**1852.** Изобретен гироскоп. **Ж. Фуко.**

Сформулировано понятие о валентности. **Э. Франкленд.**

**1854.** Открыт термический способ получения алюминия из руды. **А. Сент-Клер Девиль.**

**1860.** Разработаны методы спектрального анализа. **Г. Кирхгоф и Р. Бунзен.**

Открыт закон о распределении молекул по скоростям. **Дж. Максвелл.**

Определен точный атомный вес кислорода. **Ж. Стас.**

**1861.** Установлено понятие «критическая температура». **Д. И. Менделеев.**

Предложена теория строения органических соединений. **А. М. Бутлеров.**

**1862.** Измерена скорость распространения света в воде и других средах. **Ж. Фуко.**

**1864.** Предложены основные законы электродинамики в виде четырех уравнений, которые обобщили открытые эмпирически законы электрических и магнитных явлений. **Дж. Максвелл.**

**1864—1867.** Сформулирован закон действующих в химической реакции масс. **К. Гульдберг и П. Вааге.**

**1865.** Определена структурная формула бензола. **А. Кекуле.**

Впервые определено число молекул в 1 $см^3$. **Й. Лошмидт.**

Введено в науку понятие «энтропия». **Р. Клаузиус.**

**1868.** Обнаружен в солнечном спектре элемент гелий. **Ж. Жансен и Н. Локьер.**

**1869.** Открыт периодический закон химических элементов. **Д. И. Менделеев.**

Открыто взаимное влияние атомов в химических соединениях. **В. В. Марковников.**

**1871.** Предложена теория электромагнитного поля, распространяющегося в вакууме со скоростью света. **Дж. Максвелл.**

Предсказаны и подробно описаны неизвестные еще элементы: экабор, экаалюминий, экакремний. **Д. И. Менделеев.**

**1872.** Изобретен аммиачный способ получения соды. **Э. Сольве.**

**1873.** Введено понятие «поток плотности энергии» при распространении волн в упругих средах. **Н. А. Умов.**

**1875.** Открыт галлий (экаалюминий). **П. Лекок де Буабодран.**

**1879.** Открыт скандий (экабор). **Л. Нильсон.**

**1880.** Открыто явление пьезоэлектричества. **Пьер и Поль Кюри.**

**1881.** Первый опыт, доказавший, что движение Земли не влияет на скорость света. **А. Майкельсон.**

**1882.** Открыт закон о понижении точки замерзания растворов. **Ф. Роул.**

**1883.** Определена плотность потока энергии в электромагнитной волне. **Дж. Пойнтинг.**

**1884.** Установлен общий закон о смещении химического равновесия в зависимости от внешних факторов (принцип Ле Шателье). **А. Ле Шателье.**

Разработана теория электролитической диссоциации. **С. Аррениус.**

**1885—1891.** Создана наука о симметричной структуре кристаллов. **Е. С. Федоров.**

**1886.** Открыт германий (экакремний). **К. Винклер.**

**1887.** Разработана химическая теория водных растворов. **Д. И. Менделеев.**

**1887—1888.** Открыт фотоэлектрический эффект. **Г. Герц и А. Г. Столетов.**

**1888.** Найдена закономерность, связывающая степень диссоциации электролита с его концентрацией (закон разведения). **В. Оствальд.**

Открыты электромагнитные волны. **Г. Герц.**

**1889.** Разработана теория электролитического растворения металлов. **В. Нернст.**

Установлено понятие «активные молекулы». **С. Аррениус.**

**1890.** Разработана теория гидролиза солей. **С. Аррениус.**

**1893.** Разработана координационная теория о строении комплексных соединений. **А. Вернер.**

**1895.** Открыты Х-лучи, излучение большой проникающей силы. **В. Рентген.**

У электрона определен элементарный отрицательный электрический заряд. **Дж. Томсон.**

Изобретена радиопередача сигналов электромагнитными волнами без проводов на расстояние. **А. С. Попов.**

Обнаружен на Земле элемент гелий. **У. Рамзай.**

**1896.** Открыта естественная радиоактивность урана. **А. Беккерель.**

**1897.** Сформулированы физические принципы межпланетных полетов. **К. Э. Циолковский.**

Построена первая аэродинамическая труба. **К. Э. Циолковский.**

Установлена химическая сущность дыхательных процессов. **А. Н. Бах.**

**1898.** Открыты радиоактивные элементы полоний и радий. **М. Склодовская-Кюри и П. Кюри.**

**1899.** В электроне измерено отношение заряда к массе. **Дж. Томсон и Ф. Ленард.**

Предложена первая электронная теория валентности. **Р. Абегг и Г. Бодлендер.**

**1899—1900.** Определены основные свойства радиоактивных веществ. **М. Склодовская-Кюри и П. Кюри.**

**1900.** Начато исследование каталитических реакций при высоких давлениях и температурах. **В. Н. Ипатьев.**

Начата разработка физико-химического анализа сплавов и растворов (учение о связи между составом и свойствами). **Н. С. Курнаков.**

Открыт закон о распределении энергии в спектре абсолютно черного тела. **М. Планк.**

Передана первая в мире радиотелеграмма. **А. С. Попов.**

**1901.** Открыто свойство энергии поглощаться и излучаться квантами. **М. Планк.**

Измерена величина давления света. **П. Н. Лебедев.**

**1903.** Разработан метод хроматографического анализа. **М. С. Цвет.**

Создана теория радиоактивного распада. **Э. Резерфорд и Ф. Содди.**

**1904.** Создана первая модель атома. **Дж. Томсон.**

**1905.** Теоретически обосновано существование фотонов. **А. Эйнштейн.**

Выведено основное уравнение фотоэлектрического эффекта. **А. Эйнштейн.**

**1905—1916.** Сформулирована теория относительности. **А. Эйнштейн.**

**1907.** Получена фенол-формальдегидная пластмасса (фенопласт). **Л. Бакеланд.**

**1909.** Разработаны физико-химические основы промышленного синтеза аммиака из воздуха и водорода. **Ф. Габер.**

**1910.** Получен элемент радий в металлическом виде. **М. Склодовская-Кюри и А. Дебьерн.**

Установлено понятие об изотопах. **Ф. Содди.**

**1911.** Предложена планетарная (ядерная) модель строения атома. **Э. Резерфорд.**

Открыто явление сверхпроводимости. **Г. Камерлинг-Оннес.**

Точно измерен заряд электрона. **Р. Милликен.**

**1912.** Изобретена камера для наблюдения траектории движения элементарных частиц. **Ч. Вильсон.**

Доказана волновая природа рентгеновских лучей — открыта их дифракция в кристаллах. **М. Лауэ.**

**1913.** Установлен закон, связывающий частоту спектральных линий характеристического рентгеновского излучения с порядковым номером испускающего эти лучи элемента. **Г. Мозли.**

Открыта закономерность в радиоактивных превращениях — правило смещения. **Ф. Содди и К. Фаянс.**

Открыт дискретный характер энергии атома; сформулированы законы об излучении и поглощении энергии атомом. **Н. Бор.**

Объяснена природа линейчатых спектров атомов. **Н. Бор.**

Открыто существование изотопов у стабильных элементов (неон). **Дж. Томсон.**

**1915.** Исследованы природа и состав хлорофилла. **Р. Вильштеттер.**

Создан сухой фильтрующий противогаз. **Н. Д. Зелинский.**

**1916.** Разработаны электронные теории валентности. **В. Коссель** и **Г. Льюис.**

**1917.** Предсказана возможность индуцированного излучения. **А. Эйнштейн.**

**1919.** Бомбардировкой $\alpha$-частицами выделен из ядра азота протон. **Э. Резерфорд.**

Разработана планетарная модель атома. **Э. Резерфорд** и **Н. Бор.**

**1921.** Объяснена последовательность заполнения электронных оболочек в атомах, тем самым физически обоснована периодическая система элементов. **Н. Бор.**

**1923.** Создана совершенная теория кислот и оснований. **И. Бренстед.**

**1923—1935.** Разработана теория колебаний и распространения радиоволн. **Н. Д. Папалекси** и **Л. И. Мандельштам.**

**1924.** Предложена гипотеза о волновых свойствах частиц. **Л. де-Бройль.**

**1925.** Разработан полярографический метод анализа. **Я. Гейровский.**

**1926.** Выведено волновое уравнение квантовой механики. **Э. Шредингер.**

Создан математический аппарат квантовой механики. **В. Гейзенберг.**

**1926—1930.** Разработано промышленное получение синтетического каучука. **С. В. Лебедев.**

**1927.** Определена скорость света с точностью $\pm 4$ *км/сек*. **А. Майкельсон.**

Открыта дифракция электронов, подтвердившая волновые свойства микрочастиц. **К. Дэвиссон** и **Л. Джермер.**

Открыт принцип неопределенности. **В. Гейзенберг.**

Начата разработка теории цепных реакций. **Н. Н. Семенов** и **Г. Хиншельвуд.**

**1928.** Теоретическое открытие позитрона. **П. Дирак.**

Открыто комбинационное рассеяние света. **Л. И. Мандельштам, Г. С. Ландсберг** и **Ч. Раман.**

Открыто лекарственное вещество — пенициллин. **А. Флеминг.**

**1931.** Теоретическое открытие нейтрино. **В. Паули.**

**1932.** Открыт нейтрон. **Дж. Чэдвик.**

Открыт позитрон. **К. Андерсон.**

Предложена теория о протонно-нейтронном строении атомного ядра. **Д. Д. Иваненко** и **В. Гейзенберг.**

**1933.** «Тяжелая» вода выделена из обыкновенной. **Г. Льюис** и **Р. Макдональд.**

Открыто явление аннигиляции. **П. Блеккет** и **Дж. Оккиалини.**

**1933—1934.** Открыто свечение частиц, движущихся в среде быстрее скорости света. **П. А. Черенков** и **С. И. Вавилов.**

**1934.** Открыта искусственная радиоактивность. **Ф.** и **И. Жолио-Кюри.**

**1935.** Открыта ядерная изомерия у искусственных радиоизотопов. **И. В. Курчатов** с сотрудниками.

**1936.** Обнаружены в космических лучах мезоны. **К. Андерсон** и **С. Неддермайер.**

**1936—1938.** Разработан промышленный метод производства синтетического полиамидного волокна — нейлона. **У. Кэрозерс.**

**1937.** Впервые искусственно получен новый химический элемент — технеций. **К. Перрье** и **Э. Сегре.**

Теоретически объяснен эффект Черенкова — Вавилова. **И. В. Тамм** и **И. М. Франк.**

Синтезирован витамин $A_1$. **Р. Кюн.**

**1938.** Разработан метод термодиффузионного разделения изотопов. **К. Клаузиус** и **Г. Диккель.**

Открыто явление сверхтекучести гелия. **П. Л. Капица.**

**1939.** Открыто деление ядер урана под действием медленных нейтронов. **О. Ган** и **Ф. Штрассман.**

**1940.** Создана теория полупроводников и начато их практическое применение. **А. Ф. Иоффе.**

Открыто спонтанное деление ядер урана. **Г. Н. Флеров** и **К. А. Петржак.**

**1942.** Построен первый атомный реактор. **Э. Ферми.**

**1944.** Открыт принцип автофазировки ускорителя. **В. И. Векслер** и **Э. Макмиллан.**

Синтезирован антибиотик стрептомицин. **Э. Ваксман.**

Синтезирован хинин. **Группа американских ученых.**

**1945.** Синтезирован метанол из углекислого газа и водорода. **В. Н. Ипатьев** и **Г. Монроэ.**

**1950.** Начато применение «меченых атомов», чтобы изучать механизм химических реакций.

Искусственно получены трансурановые элементы берклий и калифорний. **Группа американских ученых** под руководством **Г. Сиборга.**

**1951.** Открыта возможность усиливать электромагнитные волны и видимый свет, используя индуцированное излучение. **В. А. Фабрикант, М. М. Вудынский** и **Ф. А. Бутаева.**

Открыт «атом» позитрония. **М. Дейч.**

**1952.** Полный синтез морфина.

**1953.** Исследована структура молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты. **Дж. Уотсон** и **Ф. Крик.**

**1954.** Созданы квантовые усилители и генераторы электромагнитного излучения. **Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, Ч. Таунс.**

Исследована структура протеинов. **Л. Полинг.**

**1954—1957.** Искусственно получены трансурановые элементы: эйнштейний, фермий, менделевий и элемент № 102. **Группа американских ученых** под руководством **Г. Сиборга.**

**1955.** Открыт антипротон. **Э. Сегре, О. Чемберлен, К. Виганд и Т. Ипсилантис.**

Искусственно получен алмаз.

**1956.** Открыт антинейтрон. **Корк и Ломбертсон.**

**1957.** Экспериментально подтверждено существование нейтрино. **К. Коуэн и Ф. Рейнес.**

**1958.** Открыт эффект упругого испускания или поглощения γ-квантов атомными ядрами, связанными в твердом теле. **Р. Мёссбауер.**

**1962.** Установлено существование двух типов нейтрино: электронных и мюонных. **Лидерман, Шварц и Стейнбергер.**

# ЧТО ЧИТАТЬ ПО ФИЗИКЕ И ХИМИИ

Дорогие ребята! В этом томе вы познакомились с ролью физики и химии в жизни людей. Вы прочитали об основных физических явлениях, их применении в технике, о строении вещества и его превращениях, о свойствах химических элементов и их соединений. Если вы захотите углубить ваши знания, то прочтите еще и другие книги, просмотрите также и научно-популярные журналы. В этом вам поможет библиографический указатель «Что читать по физике и химии».

Описания книг сгруппированы в указателе в соответствии с основными разделами тома. Внутри раздела книги и брошюры расположены по темам и по алфавиту. Оговорено, какие из них доступны лишь школьникам старших классов. О каждой книге даны следующие сведения: фамилия и инициалы автора; заглавие; подзаголовки, которые уточняют содержание; выходные данные (место издания, название издательства и год выпуска), количество страниц, иллюстрации, а иногда и серия, в которой выпущена книга, и т. п.

В разделе «Научная фантастика» дан список романов, повестей и рассказов, затрагивающих научные проблемы, относящиеся к физике и химии.

Библиографический указатель поможет правильно выбрать книгу. В конце указателя перечислены альманахи и журналы, в которых регулярно печатаются статьи и заметки, посвященные проблемам физики и химии.

## Общие вопросы

**Азимов А.** Вид с высоты. М., «Мир», 1965, 234 стр.

Книга о проблемах, стоящих перед современной наукой.

**Блудов М. И.** Беседы по физике. Ч. I—II. М., «Просвещение». Ч. I, 1964. 166 стр. с илл.; Ч. II, 1965. 163 стр. с илл. (Б-ка школьника).

**Винер Н.** Я — математик. Сокр. перевод с англ. М., «Наука», 1964. 354 стр.

Автор — «отец кибернетики» — сыграл большую роль в математическом обосновании многих открытий современной физики. В книге популярно рассказано, как автор постепенно пришел от исследований броуновского движения к кибернетике.

**Келер В.** Homo Sapiens. Человек разумный. М., «Молодая гвардия», 1964. 222 стр.

Автор излагает воззрения современной науки о прошлом, настоящем и будущем человечества. Он отводит большую роль историческому обзору развития науки и прогнозу ее путей на ближайшие десятилетия.

**Кто, когда, почему?** Перевод с польск. М., Детгиз, 1961. 256 стр. с илл.

Ответы на вопросы из самых различных областей знания. В разделе «Точные науки» — интересный материал о физических и химических явлениях.

**Кузнецов Б. Г.** Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки. М., Изд-во АН СССР, 1963. 511 стр.

Книга доступна школьникам старших классов.

**Ландау Л. Д., Китайгородский А. И.** Физика для всех. Движение. Теплота. М., «Наука», 1965. 391 стр. с илл.

Не повторяя школьного курса физики, книга помогает углубить и расширить понимание физических законов. В конце книги дан обзор энергетических ресурсов человечества.

**Наука и человечество. 1962,** М., «Знание», 1962. 412 стр. с илл.

**Наука и человечество. 1963.** М., «Знание», 1963. 526 стр. с илл.

**Наука и человечество. 1964.** М., «Знание», 1964. 432 стр. с илл.

**Наука и человечество. 1965.** М., «Знание», 1965. 408 стр. с илл.

Сборники статей советских и зарубежных ученых, рассказывающих, над чем работает мировая наука в самых различных областях знания. Большинство статей доступно школьникам старших классов.

**Орир Л.** Популярная физика. Перевод с англ. М., «Мир», 1964. 446 стр. с илл.

Книга об основных законах физики и о ее последних достижениях.

**Пайерлс Р. Е.** Законы природы. Перевод с англ. Изд. 2, испр. М., Физматгиз, 1962. 340 стр. с илл. и черт.

Доступна школьникам старших классов.

**Перельман Я. И.** Занимательная физика. Кн. 1—2. Изд. 17. М., «Наука». Кн. 1, 1965. 234 стр. с илл.; кн. 2, 1965. 280 стр. с илл.

**Перельман Я. И.** Занимательная механика. Изд. 7. М., Физматгиз, 1959. 187 стр. с илл.

**Перельман Я. И.** Знаете ли вы физику? Изд. 2, переработ. Л., ОНТИ, 1935. 339 стр. с илл. Гл. ред. науч.-попул. юнош. лит-ры.

Книги известного популяризатора помогают углубить и освежить знания физики, учат сознательно ими пользоваться. «Достигается это,— пишет автор,— рассмотрением пестрого ряда головоломок, замысловатых вопросов, занимательных рассказов, забавных задач, парадоксов и неожиданных сопоставлений из области физики».

**Радунская И.** «Безумные» идеи. М., «Молодая гвардия», 1965. 416 стр.

Квантовая физика, теория относительности и их приложения, радиоастрономия, квантовая электроника — таковы области физики, затронутые в книге автором. «Прочитав книгу, убеждаешься, что развитие науки — это не столько результат гениального прозрения одиночек, сколько плод организованного и целенаправленного труда»,— пишет в послесловии академик А. И. Берг.

Книга доступна школьникам старших классов.

**Физика.** Близкое и далекое. Проблемы. На стыках наук. Применения. Гипотезы. М., «Знание», 1963. 518 стр.

**Эллиот Л., Уилкокс У.** Физика. Перевод с англ. М., Физматгиз, 1963. 807 стр. с илл.

Книга широко распространена в США. Рассчитана на читателя, впервые знакомящегося с физикой и обладающего элементарными знаниями математики.

## Масса и движение

**Дерягин Б. В.** Что такое трение? Изд. 2, перераб. и доп. М., Изд-во АН СССР, 1963. 230 стр. (Научно-популярная серия).

**Дуков В. М.** Закон сохранения энергии. М., «Знание», 1961. 40 стр.

О работе, мощности, энергии, коэффициенте полезного действия, о видах энергии и их превращениях; о том, почему невозможен вечный двигатель.

**Ивановский М. П.** Законы движения. М., Детгиз, 1957. 127 стр. с илл. (Б-ка школьника).

Книга рассказывает о том, как были открыты законы движения.

**Игнациус Г. И.** О загадках скорости. М., Детгиз, 1959. 64 стр. с илл.

Принцип относительности движения — основа механики. В книге рассказано об этом принципе, о явлениях, связанных с относительностью движения и встречающихся в природе и технике.

**Игнациус Г. И.** Движение и покой в природе. М., «Знание», 1964. 94 стр. с илл.

Основные законы кинематики, динамики и статики. Начальные сведения о теории относительности.

**Краснов А. И.** Возможен ли вечный двигатель? М., Гостехиздат, 1956. 64 стр.

**Краснов А. И.** Волчок и применение его свойств. М., Гостехиздат, 1958. 64 стр. (Научно-популярная б-ка).

**Левантовский В. И.** Тяжесть, невесомость, перегрузки. М., «Знание», 1964. 96 стр. (Народный ун-т культуры).

О законе всемирного тяготения и полетах в космос.

**Ленский В. С., Литвин-Седой М. З.** Механика. О специальности «механика» на механико-математическом факультете Московского гос. университета. (М.), Изд-во Моск. ун-та, 1962. 43 стр.

Эта брошюра поможет читателю, интересующемуся физикой, выбрать специальность.

**Лобанов А. З.** Законы механического движения. М., Учпедгиз, 1955. 60 стр. с илл. (Б-ка школьника).

В книге раскрываются понятия, связанные с прямолинейным движением тел: скорость, ускорение, инерция, сила, вес и масса, количество движения и основные законы механики. Изложение иллюстрировано примерами из различных областей техники.

**Смилга В.** Очевидное? Нет, еще неизведанное... М., «Молодая гвардия», 1961. 352 стр.

Популярное изложение теории относительности.

**Ушаков С. З.** Законы движения. М., «Знание», 1961. 40 стр.

Кратко изложены особенности механического и молекулярного движения, история развития механики от Галилея и Ньютона до Эйнштейна.

## Звук

**Анфилов Г. Б.** Физика и музыка. Изд. 2, испр. и доп. М., «Детская литература», 1964. 192 стр. с илл. (Школьная б-ка).

В этой книге рассказано о том, как были созданы разные музыкальные инструменты и как помогала их изобретателям наука, как научились записывать звуки и как машина попробовала сочинять музыку.

**Борисов Ю. Я., Макаров Л. О.** Ультразвук в технике настоящего и будущего. М., Изд-во АН СССР, 1960. 88 стр. с илл. (Научно-популярная серия).

О сегодняшнем и завтрашнем дне ультразвуковой техники.

**Гриффин Д.** Эхо в жизни людей и животных. Перевод с англ. М., Физматгиз, 1961. 108 стр.

О способности ряда живых существ к звуколокации и о применении звуколокации в технике. Книга доступна учащимся старших классов.

**Коробко-Стефанов А. А.** Звук за работой. М., Детгиз, 1957. 96 стр. с илл. (Школьная б-ка).

Книга рассказывает, как была разгадана тайна звука и какую пользу приносит теперь звук. Отдельные главы посвящены ультразвуку.

**Кудрявцев Б. Б.** Неслышимые звуки. М., «Молодая гвардия», 1957. 159 стр. с илл.; 4 л. илл.

Автор рассказывает об ультразвуке и его свойствах, о первых применениях ультразвука в современной технике. Дано описание постройки простейшего ультразвукового генератора.

## Температура, давление

**Владимиров Л. В.** Путь к нулю. М., «Молодая гвардия», 1963. 136 стр.

Герой этой книги — холод. Читая ее, вы совершите путешествие вниз по температурной шкале, к абсолютному нулю; познакомитесь со всевозможными холодильными машинами, полупроводниковыми термобатареями, со свойствами жидких газов, с применением глубокого холода для электронно-вычислительных машин и световых генераторов—лазеров.

**Ляпунов Б. В.** Рекорды техники. М., «Знание», 1964. 40 стр.

Рассказы о получении высоких и низких температур, высоких и низких давлений. Брошюра доступна школьникам старших классов.

**Радунская И. Л.** Когда атомам тесно. М., «Знание», 1962. 48 стр.

Рассказ о том, как высокое давление помогло создать искусственные алмазы, какие удивительные превращения происходят с веществом при повышении давления.

Брошюра доступна школьникам старших классов.

## Суда, самолеты, ракеты

**Галлай М.** Через невидимые барьеры. Испытано в небе. Из записок летчика-испытателя. М., «Молодая гвардия», 1965. 348 стр. с илл.

**Жабров А. А.** Почему и как летает самолет. Изд. 2. М., Физматгиз, 1959. 56 стр. с илл. (Научно-популярная б-ка).

**Казневский В. П.** Аэродинамика в природе и технике. Изд. 2, доп. М., Учпедгиз, 1958. 136 стр. с илл. (Б-ка школьника).

**Казневский В. П.** Космические ракеты. М., Учпедгиз, 1961. 124 стр. с илл., портр. (Б-ка школьника).

**Крошкин М. Г.** Человек проникает в космос. (Научные исследования с помощью ракет и спутников). М., Воениздат, 1961. 160 стр. с илл.

**Перельман Р. Г.** Двигатели галактических кораблей. М., Изд-во АН СССР. 1962. 199 стр. с черт. (Научно-популярная серия).

**Турьян В. А.** В мире летательных аппаратов. М., Изд-во ДОСААФ, 1964. 71 стр. с илл.

Как и почему летают самолет и вертолет, как менялись формы самолетов с ростом скорости, как авиация стала сверхзвуковой.

## Электромагнитные явления

**Адирович Э. И.** Электрический ток. М., Детгиз, 1955. 72 стр. с илл. (Школьная б-ка).

**Анфилов Г. Б.** Что такое полупроводник. М., Детгиз, 1957. 143 стр. с илл. (Школьная б-ка).

В этих двух книгах рассказано, почему у полупроводников такие удивительные свойства и где они применяются.

**Артемьев И. А.** Радиофизика в нашей жизни. (Физические основы радиоэлектроники, различные применения радиотехнических устройств). М., «Знание», 1964. 144 стр. с илл.

Доступна учащимся старших классов.

**Борисов Е. Б., Пятнова И. И.** Ключ к Солнцу. Рассказы о молодой науке и новой области техники, сделавшей возможным космическое радио и телевидение, электростанции без машин и многое другое,— словом, рассказы о полупроводниках. Изд. 2, доп. М., «Молодая гвардия», 1964. 304 стр. с илл.

**Вонсовский С. В.** Природа магнетизма. М., «Знание», 1964. 40 стр.

Брошюра знакомит с тем, как современная физика объясняет природу магнетизма и как используется он в технике и для научных исследований. Книга доступна старшим школьникам.

**Голованов Л. В.** С микроскопом в радиотехнику. М., «Знание», 1964. 127 стр. с илл.

Приложение: **Плотников В.** Описание карманного любительского радиоприемника «Москва-2».

Путь радиотехники от детекторных приемников до сверхминиатюрной электронной аппаратуры.

**Грановский В. Л.** Новые пути получения электрической энергии. М., «Знание», 1962. 48 стр.

Из этой книги вы узнаете о целом ряде создаваемых теперь электрогенераторов, непохожих на вчерашние. Книга доступна школьникам старших классов.

**Жаботинский М. Е., Радунская И. Л.** Радио наших дней. М., Изд-во АН СССР, 1959. 264 стр. (Научно-популярная серия).

Книга о современных достижениях радиотехники и радиоэлектроники. Доступна школьникам старших классов.

**Леонидов И. Г.** Свет несущие. М., «Советская Россия», 1961. 168 стр. с илл.

Это история открытия таинственного «холодного света» — основы производства и применения люминофоров.

**Мезенцев В. А.** Когда помогают невидимки. В мире электроники. М., Детгиз, 1963. 160 стр.

Книга о многообразной службе, которую несут теперь электроны. Автор рассказывает о новой науке— бионике, изучающей живые организмы, чтобы использовать явления живой природы в технике.

**Плонский А. Ф.** Радиоэлектроника, или рассказ об удивительных открытиях: о том, как человек приручил волну, о новом Алладине и его лампе, о том, как подслушали разговор звезд, о ста профессиях, «мыслящей» машине и о многом другом. М., «Советская Россия», 1958. 224 стр. с илл.

**Савченко В. И.** Полупроводники на старте. М., Детгиз, 1958. 124 стр. с илл. (Школьная б-ка).

**Смагин Б. И.** Голубое свечение. М., Детгиз, 1959. 32 стр. с илл.

Брошюра посвящена замечательному открытию советских ученых Вавилова и Черенкова. В ней рассказано, как оно помогает осваивать термоядерную энергию, изучать космос и элементарные частицы.

**Суворов С. Г.** О чем рассказывает свет. М., Воениздат, 1963. 144 стр. (Научно-популярная б-ка).

Книга посвящена свойствам и природе света, применению световых лучей для изучения состава вещества и далеких небесных тел. Рассказано о перспективах использования солнечной энергии, о фотонных двигателях.

**Фабрикант В. А.** Луч идет в космос. М., «Знание», 1961. 32 стр.

Один из самых замечательных физических приборов, созданных в последние годы,— лазер. Он дает такой яркий луч, что его можно использовать вместо радиопередатчика для космической связи, а также для многих других целей. О принципах устройства такого генератора и рассказано в брошюре, доступной школьникам старших классов.

**Штейнгауз А. И.** Девять цветов радуги. М., Детгиз, 1963. 296 стр. с илл. (Школьная б-ка).

Что такое свет видимый и невидимый? Как с помощью света проник человек в недра вещества и в космос? Как научился он видеть в темноте, передавать изображения на расстояние, изучать процессы, длящиеся ничтожные доли секунды? Обо всем этом рассказывает книга.

**Шур Я. И.** Верный путеводитель. Рассказы о компасе. М., Детгиз, 1956. 208 стр. с илл. и карт.; 2 л. илл. и карт.

## Как вещество построено

**Арпя С. М.** Великий закон природы. Периодическая система элементов Менделеева и ее значение в наши дни. М.—Л., Детгиз, 1953. 112 стр. (В помощь школьнику).

**Браунбек В.** Основы ядерной физики. М., Госатомиздат, 1962. 103 стр. с илл. (Научно-популярный очерк).

**Буянов А. Ф.** Ядра, атомы, молекулы. М., Госатомиздат, 1962. 364 стр. с илл.

Книга состоит из двух частей — «В недрах атома» и «В мире молекул». Первая посвящена строению вещества, электронике и атомной технике; вторая представляет собой обзор основных направлений развития современной химии.

**Васильев М. В., Станюкович К. П.** В мире семи стихий. [М.], «Молодая гвардия», 1961. 256 стр. с илл.; 4 л. илл.

Эта книга знакомит с теми разделами физики, которые обеспечили сегодняшние успехи авиации, гидроэнергетики, ракетной техники, тепловых машин.

**Данин Д. С.** Неизбежность странного мира. Изд. 2. [М.], «Молодая гвардия», 1962. 363 стр. с портр.

Книга вводит читателя в мир идей и представлений физики нашего века. Автор рассказывает об элементарных частицах материи и о работе ученых разных стран в области ядерной физики.

**Китайгородский А. И.** Кристаллы. М., Гостехтеориздат, 1955. 64 стр. (Научно-популярная б-ка).

Эта брошюра — маленькая популярная энциклопедия кристаллографии.

**Корякин Ю. И.** Биография атома. Рассказы об открытии и использовании атомной энергии. М., Госатомиздат, 1961. 207 стр. с илл., портр.

**Кудрявцев Б. Б.** Мир в песчинке. (Рассказ о простых вещах). [М.], «Молодая гвардия», 1961. 160 стр. с илл.

Первый раздел книги — «Хаос» — знакомит с атомно-молекулярным строением вещества и свойствами газов; второй — «На пути к порядку» — рассказывает о свойствах жидкостей и их практическом применении, а третий — «В мире порядка» — о кристаллах.

**Новожилов Б. Б.** О твердых жидкостях. М., «Знание», 1963. 48 стр.

Брошюра об аморфных телах, их свойствах и отличиях от кристаллов.

**Орлов В. И., Тростинов В. Н.** Частицы, из которых состоит мир. М., «Советская Россия», 1961. 144 стр.

**Парнов Е. И.** Дальний поиск. М., Госатомиздат, 1963. 256 стр. с илл. (Научно-популярная б-ка).

Книга посвящена строению и свойствам атомного ядра и элементарных частиц, новейшим достижениям ядерной физики.

**Парнов Е. И., Глущенко Е. А.** Окно в антимир. Изд. 2. М., Госатомиздат, 1963. 79 стр. с илл.

Авторы рассказывают, как были открыты античастицы — антиподы электрона, протона, нейтрона, как объясняет современная ядерная физика некоторые космические явления, какое применение сможет найти антивещество.

**Рыдник В. И.** Четвертое состояние вещества. М., «Советская Россия», 1962. 102 стр.

Из этой книги можно подробно узнать о плазме, ее получении и возможном использовании.

**Рыдник В. И.** Что такое квантовая механика. М., «Советская Россия», 1963. 220 стр.

В этой книге объясняются основные положения квантовой механики и рассказано о том, как с ее помощью удалось понять строение и свойства атомов, молекул, кристаллов.

**Сиборг Г. Т., Вэленс Э. Г.** Элементы Вселенной. Перевод с англ. под ред. акад. А. П. Виноградова. М., Физматгиз, 1962. 260 стр. с илл.

Эту увлекательную книгу написали крупнейшие американские физики. Она охватывает широкий круг явлений — от атомов до Вселенной: из чего состоит вещество, как устроен мир и как наука проникла внутрь ядра.

**Трифонов Д. Н.** Границы и эволюция периодической системы. М., Госатомиздат, 1963. 168 стр.

Автор рассказывает об изменениях, которые произошли в периодической системе за последние десятилетия, о том, какие изменения в ней можно ждать в будущем. Книга доступна старшим школьникам.

**Франк-Каменецкий Д. А.** Плазма — четвертое состояние вещества. Изд. 2, испр. М., Госатомиздат, 1963. 160 стр. с илл. (Научно-популярная б-ка).

**Юнг Р.** Ярче тысячи солнц. Повествование об ученых-атомниках. М., Госатомиздат, 1961. 280 стр. с илл.

Краткая история «атомного века», начиная с открытия радиоактивности и кончая взрывом атомной бомбы.

## О превращениях вещества

**Азерников В. З.** От спички к ракетному топливу. [М.], «Молодая гвардия», 1961. 141 стр. с илл.

**Азерников В. З.** Разгаданный код. М., «Знание», 1963. 40 стр. с илл.

В брошюре рассказано о том, как ученые пытаются разгадать химическую основу наследственности. Книга доступна старшим школьникам.

**Андреева Е. В.** Без соли не проживешь. Л., Детгиз, 1963. 174 стр. с илл.

Поваренная соль, химическое соединение натрия и хлора... Автор рассказывает много интересного об этом всем хорошо известном веществе.

**Андреева Е. В. и Андреев Ю. Н.** Огнем рожденное. Л., Детгиз, 1957. 208 стр. с илл.

Книга об истории русского стекла, о производстве и применении стекла в науке, технике и быту.

**Бахтамов Р.** Властелин Окси-мира. М., «Детская литература», 1965. 219 стр. с илл.

Увлекательный рассказ о кислороде, его соединениях и применении их в технике.

**Буянов А. Ф.** Властелины атомов. М., «Молодая гвардия», 1962. 239 стр. с илл.

Вода и воздух, растения и полезные ископаемые — все состоит из атомов. Современная химия получает из одних сочетаний атомов молекулы-карлики, из других — молекулы-гиганты. А какие удивительные вещества можно получить из этих молекул, узнаете, прочитав эту книгу.

**Васильев М. В.** Знакомые незнакомцы. (Элементы земли, воды и воздуха). М., «Советская Россия», 1964. 350 стр.

Книга рассказывает о неметаллах, их соединениях, истории их открытия и изучения, о широком применении в промышленности и сельском хозяйстве.

**Васильев М. В.** Металлы и человек. М., «Советская Россия», 1962. 416 стр. с илл.; 8 л. илл.

Свойства металлов; руды; получение чугуна и стали; металлообработка; металлы, применяемые в технике; металлы будущего.

**Васильев М. В., Гущев С. З.** Репортаж из XXI века. Мы записали рассказы тридцати девяти советских ученых о науке и технике будущего. Изд. 2, доп. М., «Советская Россия», 1963. 340 стр.

Химии посвящен раздел «Материалы, которых ждет техника»; в разделе «Во имя жизни и изобилия» рассказывается о биохимии и применении химии в сельском хозяйстве.

**Вилле Г. Г.** Чудесный мир воды. Перевод с нем. Л., Детгиз, 1963. 142 стр.

В главе «Вода в реторте» рассказано о том, кто и как открыл химический состав воды; что такое перекись водорода; как разлагают воду на составные части; почему вода бывает «мягкой» и «жесткой».

**Власов Л. Г., Трифонов Д. Н.** Рожденные заново. М., «Знание», 1962. 48 стр.

О том, как были созданы искусственные элементы, каковы их свойства и области применения. Доступна школьникам старших классов.

**Власов Л., Трифонов Д.** Занимательно о химии. М., «Молодая гвардия», 1965. 255 стр. с илл.

Сборник маленьких рассказов о периодической системе, реакциях и соединениях, химическом анализе, практических достижениях химии.

**Вольпер И. Н.** Большая химия. [М.], «Молодая гвардия», 1961. 160 стр. с илл.

Рассказы об искусственных красках, каучуке, пластмассах и других синтетических материалах, сельскохозяйственной химии, «малой» — бытовой химии и, наконец, о будущем химической науки.

**Зубарев Г. Н.** Что ты знаешь о пластмассах? М., Детгиз, 1960. 143 стр. с илл. (Школьная б-ка).

**Зубарев Г. Н.** Химия в цехе. [М.]., «Молодая гвардия», 1962. 10 стр. с илл. (Книжки-помощники).

**Козлов П. М.** Вторжение мифа. М., «Молодая гвардия», 1960. 78 стр. с илл. (Химия идет в наступление).

О борьбе химии с коррозией, бичом металлов, о новых материалах, заменяющих металл, о химических машинах-математиках и химических двигателях.

**Кнунянц И. Л., Фокин А. В.** Покорение неприступного элемента. М., Изд-во АН СССР, 1963. 192 стр. (Научно-популярная серия).

В этой книге речь идет о фторе, о том, как химики открыли его, получили в чистом виде и нашли способы применять в технике.

**Крупин В.** Карлики рождают гигантов. М., «Молодая гвардия», 1965. 200 стр. с илл.

Очерки о биохимии.

**Лаврухина А. К., Колесов Г. М.** Образование химических элементов в космических телах. М., Госатомиздат, 1962. 172 стр. (Научно-популярная б-ка).

Книга о строении вещества, о распространении, образовании и эволюции элементов во Вселенной. Доступна школьникам старших классов.

**Лысогоров Н., Тонгур В.** Полимеры — клетка — жизнь! [М.], «Молодая гвардия», 1961. 192 стр.

В книге рассказывается о том, как устроена живая клетка, о биологических полимерах — белках-ферментах, структурных белках, нуклеиновых кислотах и их роли в образовании белка.

**Ляпунов Б.** Химия всюду. М., «Детская литература», 1965. 160 стр.

Книга о роли химии в нашей жизни и успехах химической науки.

**Моралевич Ю. А.** Мир пластмасс. М., «Детский мир», 1959. 72 стр.

Прошли века камня, бронзы, железа... Наступил век искусственных, синтетических материалов, в котором мы живем. Пластмассы — одни из важнейших представителей мира синтетики. Как они появились, что они дают нам сейчас, что можно ожидать от них в будущем — об этом рассказывает книга.

**Непсчерпаемый.** Сборник. М., «Молодая гвардия», 1964. 496 стр.

Статьи разных авторов об углероде и его соединениях.

**Нехоженые тропами.** Сборник. Составитель С. Берданосов. М., «Молодая гвардия», 1965. 240 стр. с илл.

Статьи и заметки (из журналов и газет 1964 г.) о важнейших достижениях химии, сгруппированные в два раздела: «Материалы XX века» и «В труде и быту».

**Николаев Л. А.** Катализ и химия будущего. М., «Знание», 1962. 48 стр.

Ускорить или, наоборот, замедлить ход химической реакции — такую задачу выполняют катализаторы. Автор брошюры рисует увлекательные перспективы применения катализаторов—ускорителей и замедлителей в химии.

**Новая химия.** Перевод с англ. М., Изд-во АН СССР, 1959. 208 стр. (Научно-популярная серия).

**Новое в химии.** Сборник статей. М., «Наука», 1964. 364 стр. (Научно-популярная серия).

Статьи разных авторов о новых химических элементах и реакциях, о новых методах исследования и о направлении развития химии. Для старшего возраста.

**Орбиты чудес.** Сборник. М., «Правда», 1963. 64 стр. (Б-ка «Комсомольской правды»).

Раздел «Мост в будущее» посвящен химии и перспективам развития химической науки в ближайшие два десятилетия.

**Поляков В. Г.** Кислород. Для учащихся старших классов. М., Учпедгиз, 1961. 100 стр. с илл.

**Пурмаль А. П.** В мире кремния. М., Детгиз, 1962. 96 стр.

Земная кора почти на одну треть состоит из кремниевых соединений. Прочитав эту книгу, вы узнаете о минералах, содержащих кремний, и об их свойствах и применении в технике, об искусственных его соединениях.

**Путешествие в страну элементов.** Сборник. М., «Молодая гвардия», 1963. 368 стр.

«Картой страны элементов» названа периодическая система. Авторы знакомят со свойствами химических элементов, составляющих неживую природу, а также с элементами, полученными искусственным путем.

**Ребиндер П. А.** На стыках наук. М., «Знание», 1963. 40 стр.

Рассказ о принципах и достижениях физической химии и физико-химической механики.

**Реутов О. А.** Органический синтез и его перспективы. М., Гостехиздат, 1958. 96 стр. (Научно-популярная б-ка).

Книга знакомит с тем, как химики научились создавать высокомолекулярные вещества и как в наше время из угля, нефти, природных газов и отходов различных производств создаются многие миллионы тонн различных материалов.

**Розен Б. Я.** Материалы тысячи назначений. Л., Детгиз, 1960. 143 стр. с илл.

Эта книга о том, как человек выигрывает соревнование с природой в создании всевозможных материалов и о могуществе химии, изготовляющей материалы «по заказу».

**Розен Б. Я.** Семья солеродов. М., Детгиз, 1956. 160 стр. (Школьная б-ка).

В книге описаны история открытия, свойства и применения четырех галогенов — фтора, хлора, брома и йода; упоминается также и об искусственно созданном пятом галогене — астате.

**Розен Б. Я.** Чудесные добавки. Л., «Детская литература», 1964. 183 стр. (Школьная б-ка).

Микроэлементы и их значение в сельском хозяйстве и жизни человека.

**Рудой Б. Л.** Новая жизнь стекла. М., «Знание», 1963. 48 стр.

О новых сортах и новых применениях стекла.

**Свешников М. П.** Тайны стекла. Изд. 3, доп. Л., Детгиз, 1955. 191 стр. с илл. (Школьная б-ка).

Автор рассказывает, как было открыто стекло, как его изготовляют, какие виды стекла теперь существуют и какое применение оно находит в технике.

**Степанов Б. И.** Рассказы о больших молекулах. М., Детгиз, 1961. 101 стр. с илл. (Школьная б-ка).

В книге рассказано, как создаются искусственные волокна, красители, каучуки, синтетические материалы — пластмассы. Заключительная глава посвящена химии больших молекул.

**Таубе П. Р., Руденко Е. И.** От водорода до?.. Изд. 3. М., «Высшая школа», 1964. 352 стр.

Читая эту книгу, вы совершите путешествие по периодической системе элементов, узнаете об истории их открытия, их свойствах и применении.

**Трифонов Д. Н.** Рассеянные элементы. М., «Знание», 1964. 40 стр.

Открытие, свойства и применение рассеянных элементов: скандия, галлия, германия, таллия, индия, гафния, рения.

**Трифонов Д. Н.** Путешествие в страну РАИ. М., «Молодая гвардия», 1960. 102 стр.

Книга о радиоактивных изотопах и о том, как меченые атомы помогают металлургам и врачам, химикам и биологам, агрономам и машиностроителям.

**Трифонов Д. Н.** Элемент 61, его прошлое, настоящее и будущее. М., Госатомиздат, 1960. 56 стр.

Книга доступна школьникам старших классов.

**Трифонов Д. Н.** Элементы с необычной судьбой. Технеций, астатин, франций. М., Госатомиздат, 1961. 96 стр.

Книга доступна школьникам старших классов.

**Трифонов Д. Н.** Если бы не было урана и тория... М., Изд-во АН СССР, 1963. 88 стр. (Научно-популярная серия).

Уран и торий — единственные первичные радиоактивные элементы, существующие в земных минералах и рудах. Книга доступна учащимся старших классов.

**Трифонов Д. Н.** Удивительное семейство элементов. М., «Знание», 1963. 40 стр.

В книге рассказано об истории открытия редких земель и об их удивительных свойствах. Книга доступна школьникам старших классов.

**Фердман Д. Л.** Химия живого. М., «Знание», 1963. 40 стр.

Проблема белков, нуклеиновых кислот, содержащихся в ядре живой клетки, и использование энергии питательных веществ — таково основное содержание брошюры. Брошюра доступна старшим школьникам.

**Ферсман А. Е.** Занимательная геохимия. Химия Земли. Изд. 3. Л., Детгиз, 1954. 488 стр. (Школьная б-ка).

Герои этой книги — наиболее распространенные и важные химические элементы, которые встречаются в живой и неживой природе. Автор рассказывает об их свойствах, о путешествии атомов в земных недрах, водной и воздушной стихии и об атомах в космосе.

**Фиалков Ю. Я.** Девятый знак. М., Детгиз, 1963. 142 стр. с илл.

О том, как химики научились получать сверхчистые вещества и какое значение это имеет для науки и техники.

**Финкельштейн Д. Н.** Инертные газы. М., «Знание», 1960. 40 стр.

Брошюра доступна школьникам старших классов.

**Фролов В. А., Юдкевич Р. В.** Металлы будущего. М., «Советская Россия», 1960. 184 стр.

Авторы подробно характеризуют металлы ряда групп менделеевской таблицы и значение в современной технике чистых металлов и сплавов с редкими металлами.

**Храпковский А. И.** Занимательные очерки по химии. Л., Детгиз, 1958. 102 стр. (Школьная б-ка. В помощь самодеятельности пионеров и школьников).

**Шпаусус З.** Путешествие в мир химии. Перевод с нем. М., Учпедгиз, 1959. 454 стр.

Книга знакомит с важнейшими химическими элементами, их соединениями, основными законами и теориями химии, применениями ее в быту и промышленности.

**Юрмин Г.** Веселый художник, или Чудеса без чудес. Изд. 2. Илл. Л. Ромасенко и В. Рытман. М., «Детская лит-ра», 1964. 109 стр. с илл. (Школьная б-ка).

Рассказы о пластмассах, искусственных волокнах, каучуке, коже.

## История науки о веществе и энергии

**Арлазоров М. С.** Циолковский. Предисл. Ю. Гагарина. М., «Молодая гвардия», 1962. 319 стр. с илл., портр. (Жизнь замечательных людей).

**Болховитинов В. Н.** Александр Григорьевич Столетов. 1839—1896. [М.], «Молодая гвардия», 1953. 512 стр. с илл. (Жизнь замечательных людей).

**Бронштейн М. П.** Солнечное вещество. Изд. 2. М., Детгиз, 1959. 104 стр. с илл.

В этой интересной и увлекательно написанной книге изложена история открытия гелия, элемента, который сначала был обнаружен на Солнце и только потом на Земле.

**Бублейников Ф. Д.** О движении. Из истории механики. М., Детгиз, 1956. 212 стр. с илл. (Школьная б-ка).

**Бублейников Ф. Д.** Джемс Кларк Максвелл. М., «Знание», 1960. 48 стр.

**Бублейников Ф. Д., Минченко Е. Я.** Очерк развития классической механики. М., Учпедгиз, 1961. 224 стр. с илл.

**Веселовский И. Н.** Архимед. М., Учпедгиз, 1957. 112 стр. с илл. (Классики физики).

**Веселовский И. Н.** Христиан Гюйгенс. М., Учпедгиз, 1959. 112 стр. с илл., портр.

**Гумилевский Л. И.** С востока — свет! М., Детгиз, 1958. 248 стр.

Биографическая повесть о жизни великого русского химика А. М. Бутлерова.

**Дижур Б. А.** Путешественники-невидимки. Рассказы об элементах. М., Детгиз, 1956. 96 стр. (Школьная б-ка).

В книге рассказывается об истории открытия элементов щелочной группы периодической системы. Заключительный рассказ посвящен открытию Д. И. Менделеевым периодического закона элементов.

**Дуков В. М.** Петр Николаевич Лебедев. Изд. 2. М., Учпедгиз, 1956. 120 стр.

**Ивановский М. П.** Золотое правило. М., Детгиз, 1959. 64 стр. с илл. (Школьная б-ка).

Рассказ о великом ученом древности Архимеде.

**Ильин М., Сегал Е.** Александр Порфирьевич Бородин. М., «Молодая гвардия», 1957. 416 стр. (Жизнь замечательных людей).

**Келер В. Р.** Сергей Вавилов. М., «Молодая гвардия», 1961. 240 стр. (Жизнь замечательных людей).

**Космодемьянский А. А.** Очерки по истории механики. Изд. 2, доп. М., «Просвещение», 1964. 456 стр.

Жизнь и труды Л. Эйлера, М. В. Ломоносова, Н. Е. Жуковского, А. Н. Крылова, К. Э. Циолковского и других ученых.

**Кудрявцев П. С.** Исаак Ньютон. Изд. 3. М., Учпедгиз, 1963. 142 стр. с илл. и портр. (Классики физики).

**Кузнецов Б. Г.** Эйнштейн. (Изд. 2). М., Изд-во АН СССР, 1963. 414 стр. с илл. (Научно-биографическая серия).

О жизни и научном творчестве Альберта Эйнштейна — одного из величайших физиков современности.

**Нечаев И.** Рассказы об элементах. М., Детгиз, 1960. 144 стр. с илл.

Научно-художественные очерки об истории открытия ряда химических элементов.

**Пиотровский К. В.** Сергей Лебедев. М., «Молодая гвардия», 1961. 238 стр. (Жизнь замечательных людей).

**Писаржевский О. Н.** Наука древняя и молодая. М., «Молодая гвардия», 1962. 208 стр.

Очерки о работах выдающихся ученых-химиков академиков Н. Д. Зелинского, С. В. Лебедева, А. Н. Несмеянова, Н. Н. Семенова, В. А. Каргина, П. А. Ребиндера, В. А. Энгельгардта.

**Писаржевский О. Н.** Дмитрий Иванович Менделеев. Изд. 2, доп. М., «Молодая гвардия», 1951. 464 стр. (Жизнь замечательных людей).

**Файнбойм И. Б.** Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. М., «Просвещение», 1964. 64 стр. с илл.

**Файнбойм И. Б.** Эрнест Резерфорд — человек, заглянувший в глубь атома. М., «Знание», 1958. 48 стр. с илл. и портр.

**Ферми Л.** Атомы у нас дома. Новосибирск, Изд-во Сибирского отд-ния АН СССР, 1963. 339 стр. с илл.

Автор рассказывает о жизни и работе Энрико Ферми — одного из величайших физиков современности.

**Шаскольская М. П.** Фредерик Жолио-Кюри. М., «Молодая гвардия», 1959. 267 стр. с илл. и портр.

## Чем и как измеряют

**Борисов В. Б.** Эталоны и системы единиц. М., «Знание», 1964. 62 стр.

**Депман И. Я.** Меры и метрическая система. М.—Л., Детгиз, 1953. 100 стр. (В помощь школьнику).

Меры (длины, веса и площади), употреблявшиеся в древности разными народами. Преимущества принятой теперь метрической системы мер. Отдельная глава посвящена старым русским мерам.

**Плонский А. Ф.** Измерения и меры. М., Гостехиздат, 1956. 64 стр. (Научно-популярная б-ка).

Читатель знакомится с эталонами мер длины и веса, измерительными приборами, точностью и способами измерений физических величин — времени, температуры, давления, с электрическими измерениями.

**Резников Л. И.** Международная система единиц в курсе физики средней школы. Изд. 2, доп. М., «Просвещение», 1964. 72 стр.

## Справочные издания

**Гальперштейн Л. Я. и Хлебников П. П.** Лаборатория юного физика. М., Детгиз, 1962. 128 стр. с илл. (Б-ка пионера «Знай и умей»).

**Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г.** Справочник по элементарной физике. Изд. 2. М., Физматгиз, 1962. 208 стр.

**Соколова Е. Н.** Юному физику. М., Учпедгиз, 1956. 256 стр.

Справочные материалы, примеры, вопросы, задачи, описание изготовления простейших физических приборов.

Книга рассчитана на школьников среднего и старшего возраста.

**Хендель А.** Основные законы физики. Перевод с нем. Изд. 2, М., Физматгиз, 1963. 310 стр.

Справочник (механика, молекулярная физика, оптика, электричество, атомная физика).

## Научная фантастика

**Беляев А.** Продавец воздуха. Роман. Собр. соч. Т. 2. М., «Молодая гвардия», 1963, стр. 131—276.

**Беляев А.** Светопреставление. Рассказ. Собр. соч. Т. 8. М., «Молодая гвардия», 1964, стр. 6—75.

**Беляев А.** Над бездной. Рассказ. Собр. соч. Т. 8. М., «Молодая гвардия», 1964, стр. 225—243.

**Бердник О.** Путешествие в антимир. В сб.: Бердник О. Сердце Вселенной. Перевод с укр. Ташкент, «Ёш гвардия», 1963, стр. 63—112.

**Верн Ж.** Таинственный остров. Перевод с франц. Собр. соч. Т. 12. М., Изд-во худож. лит-ры, 1957.

**Верн Ж.** Двадцать тысяч лье под водой. Перевод с франц. Собр. соч. Т. 4. М., Изд-во худож. лит-ры, 1957.

**Верн Ж.** С Земли на Луну. Вокруг Луны. Перевод с франц. Собр. соч. Т. 1. М., Изд-во худож. лит-ры, 1957, стр. 319—686.

**Верн Ж.** Опыт доктора Окса. Перевод с франц. Собр. соч. Т. 12. М., Изд-во худож. лит-ры, 1957, стр. 367—624.

**Верн Ж.** Необычайные приключения экспедиции Барсака. Перевод с франц. (Роман). М., Географгиз, 1958. 168 стр. с илл.

**Войскунский Е., Лукодьянов И.** Экипаж «Конга». Книга о новейших фантастических открытиях и старинных происшествиях, о тайнах вещества и о многих приключениях на суше и на море. М., Детгиз, 1962. 544 стр. с илл. (Б-ка приключений и научной фантастики).

**Гансовский С. Ф.** Миша Перышкин и Антимир. В кн.: Гансовский С. Шаги в неизвестное. Повести и рассказы. М., Детгиз, 1963, стр. 70—90.

**Гернсбек Х.** Ральф 124-С-41+. Роман о жизни в 2660 году. Перевод с англ. М., «Прогресс», 1964. 165 стр.

Книга написана в 1911 г. Интересен научный и технический прогноз автора по представлениям того времени.

**Гребнев Г.** Невидимка. Рассказ. В кн.: «Невидимый свет». М., «Молодая гвардия», 1959, стр. 102—114.

**Гуревич Г.** Иней на пальмах. Повесть. М., Трудрезервиздат, 1957. 160 стр. с илл.

**Гуревич Г.** Рождение шестого океана. Роман. М., Профтехиздат, 1960. 459 стр. с илл. (Фантастика. Приключения).

**Днепров А.** Глиняный бог. Повесть. В кн.: Днепров А. Формула бессмертия. Рассказы и повести. [М.], «Молодая гвардия», 1963, стр. 3—95, с илл.

**Днепров А.** Пятое состояние. Рассказ. В кн.: Днепров А. Мир, в котором я исчез. М., «Молодая гвардия», 1962, стр. 44—70.

**Днепров А.** Пурпурная мумия. (Рассказы). М., «Детская литература», 1965. 284 стр. с илл. (Б-ка приключений и научной фантастики).

**Долгушин Ю.** ГЧ (Генератор Чудес). Научно-фантастический роман. [М.], Трудрезервиздат, 1959. 424 стр. с илл.

**Ефремов И.** Cor Serpentis (Сердце Змеи). Повесть. В кн.: Ефремов И. Юрта Ворона. М., «Молодая гвардия», 1960, стр. 214—284.

**Кларк А.** Лунная пыль. Рассказы. Перевод с англ. М., «Знание», 1965. 344 стр. с илл.

**Конан Дойл А.** Открытие Рафлза Хоу. Роман. В сб.: Конан Дойл А. Избранные научно-фантастические произведения. [М.], «Молодая гвардия», 1957, стр. 12—104.

**Куприн А. И.** Жидкое солнце. Собр. соч. Т. 5. М., «Правда», 1964, стр. 334—393.

**Нечаев И.** Белый карлик. Рассказ. М.—Л., Детгиз, 1943. 55 стр.

**Полещук А.** Великое Делание, или Удивительная история доктора Механикуса и его собаки Альмы. Повесть. М., Детгиз, 1959. 192 стр. с илл.

**Полещук А.** Ошибка Алексея Алексеева. Повесть. [М.], «Молодая гвардия», 1961. 170 стр. с илл.

**Савченко В.** Черные звезды. Повесть. М., Детгиз, 1960, стр. 3—183.

**Стругацкий А., Стругацкий Б.** Страна багровых туч. Научно-фантастическая повесть. М., Детгиз, 1960. 296 стр. с илл. (Б-ка приключений и научной фантастики).

**Толстой А. Н.** Гиперболоид инженера Гарина. Аэлита. М., Детгиз, 1963. 447 стр. с илл. (Б-ка приключений и научной фантастики).

**Уэллс Герберт.** Война миров. Перевод с англ. Собр. соч. Т. 2. М., «Правда», 1964, стр. 5—160.

**Уэллс Герберт.** Война в воздухе. Перевод с англ. Собр. соч. Т. 4. М., «Правда», 1964, стр. 3—292.

**Уэллс Герберт.** Человек, который делал алмазы. Перевод с англ. Собр. соч. Т. 1. М., «Правда», 1964, стр. 432—440.

**Уэллс Герберт.** Хрустальное яйцо. Перевод с англ. Собр. соч. Т. 3. М., «Правда», 1964, стр. 476—494.

**Циолковский К. Э.** Путь к звездам. Сб. научно-фантастических произведений. М., Изд-во АН СССР, 1960. 353 стр. с илл.

## Сборники

В московских и ленинградских издательствах выходят альманахи и сборники научно-фантастических произведений и научно-популярных статей. В них вы можете найти произведения, непосредственно касающиеся физики и химии.

**Альманах научной фантастики.** Вып. 1. М., «Знание», 1964. 326 стр. Вып. 2, 1965. 296 стр. Вып. 3, 1965. 278 стр.

**В мире фантастики и приключений.** Л., Лениздат, 1959—1964. [Сб. 1], 1959. 576 стр. [Сб. 2], 1963. 672 стр. [Сб. 3], 1964. 712 стр.

**Мир приключений.** Альманах. М., Детгиз, 1955—1964. **№ 1**, 1955. 458 стр. с илл. **№ 2**, 1956. 365 стр. с илл. **№ 3**, 1959. 440 стр. с илл. **№ 4**, 1959. 383 стр. с илл. **№ 5**, 1959. 443 стр. с илл. **№ 6**, 1961. 327 стр. с илл. **№ 7**, 1962. 318 стр. с илл. **№ 8**, 1962. 296 стр. с илл. **№ 9**, 1963. 544 стр. с илл. **№ 10**, 1964. 798 стр. с илл. **№ 11**, 1965. 784 стр. с илл.

**Научно-фантастические рассказы американских писателей.** Перевод с англ. М., Изд-во иностранной лит-ры, 1960. 528 стр.

**Библиотека современной фантастики в 15 томах.** М., «Молодая гвардия», 1965.

Том 1. Ефремов И. Туманность Андромеды. Звездные корабли, 1965. 462 стр.

Том 2. Кобо Абэ. Четвертый ледниковый период. Тоталоскоп, 1965. 236 стр.

Том 3. Брэдбери Р. 451° по Фаренгейту. Рассказы, 1965. 344 стр.

Том 4. Лем С. Возвращение со звезд. Звездные дневники Ийона Тихова, 1965. 398 стр.

Том 5. Антология фантастических рассказов. Переводы с итальянского, польского, французского, чешского, немецкого, японского. 1965. 318 стр.

**Современная зарубежная фантастика.** М., «Молодая гвардия», 1964. 396 стр.

**Пути в незнаемое.** Писатели рассказывают о науке. М., «Советский писатель», 1960—1964. Сб. 1, 1960. 527 стр. Сб. 2, 1962. 582 стр. Сб. 3, 1963. 636 стр. Сб. 4, 1964. 610 стр. Сб. 4. 1965. 500 стр.

Сборники доступны школьникам старшего возраста.

**Фантастика, 1962 год.** М., «Молодая гвардия», 1962. 480 стр.

**Фантастика, 1963 год.** М., «Молодая гвардия», 1963. 365 стр.

**Фантастика, 1964 год.** М., «Молодая гвардия», 1964. 367 стр.

**Фантастика, 1965 год.** Вып. 1. М., «Молодая гвардия», 1965. 286 стр. Вып. 2. 1965. 360 стр. Вып. 3. 1965. 224 стр.

**Хочу все знать.** Научно-популярный альманах. (Для сред. и старш. возраста). Л., Детгиз (Ленингр. отд-ние), 1957—1965. 1957. 280 стр. 1959. 280 стр. 1960. 278 стр. 1961. 303 стр. 1963. 336 стр. 1965. 317 стр.

**Эврика.** (Идеи. Поиски. Решения). Сб. М., «Молодая гвардия», 1963—1964.

1963. 352 стр. с илл.

1964. 280 стр. с илл.

## Научно-популярные журналы

**«Знание — сила».** Ежемесячный научно-популярный и научно-художественный журнал рабочей молодежи. Помещает статьи и очерки о достижениях физики, химии, биологии, а также техники и технических наук; информации о новых книгах, научную фантастику.

**«Наука и жизнь».** Ежемесячный научно-популярный журнал Всесоюзного о-ва «Знание».

Рассчитан на широкий круг читателей. Печатает статьи о проблемах и достижениях науки и техники. Большое место уделено практическому применению физических и химических открытий. В каждом номере приведены физические, математические и логические задачи.

**«Природа».** Ежемесячный популярный естественнонаучный журнал Академии наук СССР.

Доступен школьникам старших классов. Публикует статьи ученых о проблемах и достижениях естественных наук.

**«Техника — молодежи».** Ежемесячный молодежный производственно-технический журнал. В основном помещает статьи ученых и инженеров. Дает рецензии на новые научно-популярные книги; помещает научно-фантастические произведения.

**«Химия и жизнь».** Ежемесячный научно-популярный журнал Академии наук СССР.

Рассчитан на широкий круг читателей. Печатает статьи о химии и смежных науках. Публикует научную фантастику.

**«Юный техник».** Ежемесячный популярный научно-технический журнал для юношества. Большое внимание уделяет техническому творчеству, даются описания и чертежи моделей.

# СЛОВАРЬ-УКАЗАТЕЛЬ

## А

**Абсолютно черное тело** — тело, поглощающее полностью весь падающий на него поток излучения.— 174, 217, 546

**Авиценна** (Ибн Сина), Абу Али (ок. 980—1037)— таджикский философ и естествоиспытатель.— 463

**Авогадро,** Амедео (1776—1856) — итальянский химик и физик.— 544

**Авогадро число** — $6{,}02 \cdot 10^{23}$ — число молекул в грамм-молекуле или атомов в грамм-атоме.— 204, 415, 527

**Автоматическая космическая станция** — космический аппарат, приспособленный для научных исследований.— 44—51

**Автопилот** — устройство для автоматического управления летательным аппаратом.— 78

**Агглютинация** — см. Коагуляция.

**Агрегатное состояние вещества** — общее наименование для твердого, жидкого и газообразного состояний вещества.— 429

**Аденозинтрифосфорная кислота** — соединение, благодаря которому осуществляется перенос и выделение энергии в живом организме. — 20

**Адиабатическая пушка** — установка для сжатия газов.— 131

**Адиабатический процесс** — процесс, протекающий без теплового обмена со средой.— 95, 141

**Адреналин** — гормон, вещество, поддерживающее жизнедеятельность живых организмов.— 493

**Адсорбент** — тело, на поверхности которого происходит поглощение веществ из окружающей среды.— 414, 415

**Адсорбция** — поглощение различных веществ из газов или жидкостей на поверхности твердых тел — адсорбентов.— 414, 422

**Азбука Морзе** — телеграфный код, в котором каждой букве алфавита соответствует комбинация точек и тире.— 221

**Азотобактерии** — бактерии, способные усваивать атмосферный азот.— 437

**Акваланг** — аппарат со сжатым воздухом, позволяющий человеку длительное время дышать под водой.— 86

**Аккумулятор электрический** — устройство, превращающее электрическую энергию в химическую и обратно.— 258, 408

**Акрилонитрил** — химическое соединение, из которого получают полимеры для волокон «нитрон». — 467

**Активационный анализ** — метод химического анализа, основанный на превращении исследуемого вещества в радиоактивное воздействием облучения нейтронами или быстрыми частицами.— 382—384

**Активные молекулы** — молекулы, обладающие избыточной кинетической энергией.— 546

**Актиноиды** — 15 радиоактивных элементов III группы периодической таблицы. — 334, 357, 392

**Акустика** — учение о звуке.— 93

**Ализарин** — органический краситель красного цвета.— 459, 460

**Аллотропические формы** (модификации) — формы существования одного и того же элемента, отличающиеся физическими свойствами и строением.— 131, 435

**Алмазы искусственные.**— 162, 548

**Альварец,** Луис (р. 1911) — американский физик.— 285

**Альфа-распад** — тип радиоактивного превращения, при котором испускаются альфа-частицы.—285, 286, 357

**Альфа-частица** — ядро атома гелия.— 275, 382

**Америций** — искусственно полученный химический элемент № 95. — 357, 360, 392

**Амиды** — органические вещества, содержащие амидную группу (CONH).— 434

**Амилаза** — один из ферментов; вещество, ускоряющее химические реакции в живых организмах.— 506

**Аммиака синтез.**— 399, 437

**Аминокислоты** — органические соединения, содержащие одновременно две функциональные группы —$NH_2$ и COOH — у одного углеродного атома. Из аминокислот состоят белки.— 21, 457, 498—500, 509

**Ампер** — единица силы электрического тока в СИ.— 207, 527, 529

**Ампер,** Андре Мари (1775—1836) — французский физик и математик.— 205, 545

**Амплитуда колебания** — величина, размах колебания. — 31, 111, 186, 226

**Ангстрем**—единица длины=$10^{-8}$ *см*.=$10^{-10}$ *м*.— 413, 529

**Ангстрем,** Андерс Ионас (1814—1874) — шведский физик.— 529

**Андерсон,** Карл Дэвид (р. 1905) — американский физик.— 283, 547

**Анестезин** — обезболивающее вещество.— 496

**Анизотропии закон:** физические свойства твердых тел различны при измерениях в разных направлениях.— 371, 372

**Анилин.**— 459

**Анион** — отрицательно заряженный ион в электролите.— 416

**Аннигиляция** — превращение частицы и античастицы в форму материи, не имеющей массы.— 148, 270, 354, 547

**Анод** — положительный электрод, на котором разряжаются отрицательные ионы—анионы.— 229

**Анодирование** — электролитическое образование пленки окислов на поверхности металла.— 447

**Антенна** — устройство для получения и приема электромагнитных волн.— 221, 227

**Античастица** — элементарная частица, спин и масса которой равны спину и массе «основной» частицы, а электрический заряд и магнитный момент равны по величине и противоположны по знаку.—268, 353, 355, 369

**Антигиперон** — элементарная частица.—270

**Антинейтрино.**— 267, 272, 286

**Антинейтрон.**— 269, 548

**Антинуклон.**— 269

**Антипротон.**— 269, 306, 548

**Ар** — мера площади = 100 $м^2$.— 530

**Араго,** Доменик Франсуа (1786—1853) — французский физик и астроном.— 95, 205, 206, 545

**Аристотель** (384—322 до н. э.) — древнегреческий философ.— 543

**Армированные пластики** — полимеры, упрочненные волокнистым материалом.— 488

**Ароматические углеводороды** — органические вещества, в молекулах которых есть бензольные кольца.—456

**Аррениус,** Сванте Август (1859—1927) — шведский физико-химик.— 291, 546

**Архимед** (ок. 287—212 до н. э.) — древнегреческий математик и механик.— 84, 179, 543

**Архимеда сила** — действует на тело, погруженное в жидкость, направлена вверх.— 214

**Аршин** — старинная мера длины в России = = 71,12 *см*.— 524, 531

**Аскорбиновая кислота** (витамин С) — органическое вещество, необходимое для нормального обмена веществ в живом организме.— 493, 497

**Ассоциированные молекулы** — молекулы, соединенные в более крупную частицу.— 433

**Астат** — искусственно полученный химический элемент № 85.— 338, 542

**Астрономическая единица** — расстояние от Земли до Солнца, мера длины в астрономии = 149 598 100 ± ±750 *км*.— 243, 246, 530

**Астрофизика** — раздел астрономии, исследующий физическое состояние небесных тел.— 346

**Астрохимия** — раздел астрономии, исследующий химический состав небесных тел.— 351

**Атактические полимеры** — полимеры, в молекулах которых боковые группы расположены нерегулярно.— 479

**Атмосфера техническая** — единица давления, равна 0,9806 бара или 1 *кгс/см*$^2$.—127, 529, 530

**Атмосфера физическая** — давление, уравновешиваемое столбом ртути в 760 *мм* при температуре 0° Ц.— 530

**Атом** — наименьшая частица химического элемента.— 262

**Атомистическая теория** — учение о прерывистом, зернистом строении материи.— 543

**Атомная бомба** — устройство для осуществления взрыва, вызываемого неуправляемым делением или синтезом атомных ядер.— 270

**Атомный вес** — масса атома элемента, выраженная в единицах атомного веса. Единица атомного веса — $^1/_{12}$ массы атома углерода $C^{12}$.— 321, 322, 545

**Атомный (ядерный) реактор** — устройство для осуществления регулируемой цепной реакции деления атомных ядер.— 295, 547

**Афелий** — наиболее удаленная от центрального тела точка орбиты небесного тела, обращающегося вокруг него, например Солнца.— 44

**Аэродинамика** — наука о движении в газообразной среде.— 67

**Аэродинамическая труба** — установка для исследования поведения обтекаемых тел в газовом потоке.— 71, 546

**Аэродинамическое качество** — отношение подъемной силы самолета к сопротивлению среды.— 67, 70

# Б

**Бактериофаг.** — 501

**Бальмер,** Иоганн Якоб (1825—1898) — швейцарский математик. — 178, 179

**Бар** — единица давления в СИ.— 529

**Барбитуровая кислота** — органическое вещество, производные которого (барбитураты) применяются как снотворное.— 496

**Барионы** — общее название тяжелых элементарных частиц.— 268

**Барн** — единица эффективного поперечного сечения при ядерных процессах = $10^{-24}$ *см*$^2$.— 525

**Басов,** Николай Геннадиевич (р. 1922) — советский физик.— 547

**Бах,** Алексей Николаевич (1857—1946) — советский биохимик.— 546

**Бегущей волны лампа** — радиолампа.— 236

**Безынерционность.**— 231

**Бейльштейн,** Федор Федорович (1838—1906) — русский химик-органик.— 454

**Беккерель,** Антуан Анри (1852—1908) — французский физик.— 274, 317, 546

**Бел** (децибел) — логарифмическая единица измерения отношений физических величин.— 98

**Белки** — высокомолекулярные вещества, состоящие из аминокислот, важнейшая составная часть всех живых организмов.— 20, 457, 499, 505, 509

**Бензол** — простейший ароматический углеводород.—456, 545

**Берклий** — искусственно полученный химический элемент № 97.— 341, 392, 542, 547

**Бернулли,** Даниил (1700—1782) — швейцарский математик и механик, в 1725—1733 гг. работал в России.—68

**Бертолле,** Клод Луи (1748—1822) — французский химик.— 150

**Берцелиус,** Иёнс Якоб (1779—1848) — шведский химик и минералог.— 451, 536, 539, 544, 545

**Бета-распад** — радиоактивное превращение атомных ядер, сопровождаемое испусканием электронов или позитронов (бета-частицы).— 266, 271, 272, 285, 286, 288

**Биение** — периодическое изменение амплитуды колебаний, происходящих одновременно, например звуковых, электромагнитных.— 102

**Бинауральный эффект** — способность слухового аппарата определять направление на источник звука.— 99

**Биополимеры** — полимерные вещества, образующиеся в живых организмах.— 457

**Биохимия** — наука о химических процессах, свойственных живой материи.— 389

**Бит** — единица измерения информации.— 531

**Благородные газы** — элементы нулевой группы периодической системы.— 330

**Блеккетт,** Патрик Мейнард Стюард (р. 1897) — английский физик.— 547

**Бозе,** Шатьендранат (р. 1892) — индийский физик.— 271

**Бойль,** Роберт (1627—1691) — английский химик и физик.— 94, 543

**Бойля — Мариотта закон:** объем газа при постоянной температуре обратно пропорционален давлению.— 543

**Болевой порог восприятия** — предел чувствительности уха по отношению к звукам очень большой мощности.— 99

**Болометр** — прибор для измерения лучистой энергии.— 175, 251

**Больцман,** Людвиг (1844—1906) — немецкий физик.— 165

**Бонч-Бруевич,** Михаил Александрович (1888—1940) — советский инженер и физик.— 231

**Бор,** Нильс Генрик Давид (1885—1962) — датский физик.— 178, 179, 218, 325, 546, 547

**Бора правило.**— 218

**Боразон** — синтетическое соединение, не уступающее по твердости алмазу. — 133

**Брадлей,** Джеймс (1693—1762) — английский астроном.— 544

**Браунер,** Богуслав (1855—1935) — чешский химик.— 331

**Бройль,** Луи де (р. 1892) — французский физик.— 195, 547

**Бунзен,** Роберт Вильгельм (1811—1899) — немецкий химик.— 347, 380, 452, 545

**Бустер** — вспомогательный механизм для увеличения рабочего усилия машины.— 76

**Бутлеров,** Александр Михайлович (1828 — 1886) — русский химик.— 460, 474, 475, 545

**Бэкон,** Фрэнсис (1561—1626) — английский философ и естествоиспытатель.— 145

# В

**Вавилов,** Сергей Иванович (1891—1951) — советский физик.— 184, 185, 193, 547

**Вакуум** — разреженное состояние газа.— 116, 210, 212, 351, 369, 370

**Валентность** — свойство атома соединяться с определенным числом других атомов.— 427, 431, 545—547

**Ван-Гельмонт,** Ян Баптист (1577—1644) — голландский естествоиспытатель. — 543

**Ван-дер-Ваальс,** Ян Дидерик (1837—1923) — голландский физик.— 139

**Вант-Гофф,** Якоб Гендрик (1852—1914) — голландский химик.— 460

**Ватт** — единица мощности в СИ.— 529

**Вебер** — единица измерения потока электромагнитной индукции в СИ.— 208

**Векслер,** Владимир Иосифович (р. 1907) — советский физик.— 547

**Вектор** — изображение любой величины, имеющей направление, например, силы.— 30

**Вёлер,** Фридрих (1800—1882)—немецкий химик.—545

**Верста** — русская мера длины = 1,0668 *км*.— 531

**Вершок** — старинная русская мера длины = 4,445 *см*.— 524, 531

**Вес тела** — сила, с которой тело притягивается к Земле.— 526, 543

**Весовой анализ** — метод определения количественного состава веществ.— 381, 382

**Вестибулярный аппарат** — орган человека и животных, обладает чувствительностью к изменению равновесия.— 59

**Вечный двигатель второго рода** — воображаемый двигатель, способный превращать в работу теплоту холодильника — 157

**Взлетно-посадочная скорость самолета.**— 74

**Вильсон,** Чарлз Томсон Рис (1869—1960) — английский физик.— 303, 546

**Вильсона камера** — прибор, делающий видимыми следы движущихся элементарных частиц.— 304, 382

**Вильштеттер,** Рихард (1872—1942) — немецкий химик-органик.— 547

**Вин,** Вильгельм (1864—1928) — немецкий физик.— 192

**Винклер,** Клеменс Александр (1838—1904) — немецкий химик.— 315, 382

**Вирусы** — живые организмы, более мелкие, чем микробы.— 21, 501

**Витамин С** — см. Аскорбиновая кислота.

**Витамины** — вещества, жизненно необходимые организму.— 458, 497, 505

**Водоизмещение** — количество вытесненной судном воды.— 89

**Водород атомарный.**— 328, 346, 350, 352

**Водородная связь** — соединение двух атомов в разных молекулах «через водород».— 433

**«Водородная смерть Вселенной»** — ложный вывод некоторых ученых из современных научных данных.— 352

**Волны** — распространение колебаний.— 93, 171, 212, 221

**Волны электромагнитные** — электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве.— 212

**Вольт** — единица измерения разности электрических потенциалов в СИ.— 529

**Вольта,** Алессандро (1745—1827) — итальянский физик и физиолог.— 203, 529, 544

**Вольтов столб** — гальванический элемент.— 544

**Вольтова дуга** — электрический разряд, возникающий между электродами.— 367

**Всемирного тяготения закон:** сила взаимодействия двух тел пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.— 543

**Вуд,** Роберт Уильямс (1868—1955) — американский физик.— 173

**Вулканизация** — превращение сырого каучука в эластичную резину.— 475

**Выпрямитель** — устройство для преобразования переменного тока в постоянный.— 253, 376

**Высокодисперсный** — сильно раздробленный.— 422

**Выталкивающая сила** — сила, действующая на погруженное в жидкость тело, равна весу вытесненной жидкости.— 81

**Вязкость** — способность материала сопротивляться перемещению в нем одного слоя относительно другого.— 363

# Г

**Габер,** Фриц (1868—1934) — немецкий химик.— 546

**Газовая динамика** — раздел механики газов и жидкостей, изучает их движение с учетом сжимаемости.— 68

**Газо-жидкостная хроматография** — метод химического анализа.— 388

**Галактика** — звездная система, в состав которой входит Солнце.— 267

**Галилей,** Галилео (1564—1642) — итальянский астроном, физик и механик.— 25, 142, 145, 543

**Галогены** — химические элементы VII группы периодической системы.— 330, 427, 431, 435

**Галс** — курс судна относительно ветра.— 92

**Гальвани,** Луиджи (1737—1798) — итальянский физиолог и физик.— 203, 544

**Гальванические элементы** — источники электрического тока, получаемого при химической реакции.— 203, 204, 406, 408, 544

**Гальванометр** — прибор, измеряющий слабые электрические токи.— 107

**Гальванопластика** — электролитическое осаждение металла на поверхность предмета для воспроизведения его формы.— 204, 545

**Гальваностегия** — электролитическое осаждение тонкого слоя металла на поверхности металлического предмета для защиты его от коррозии.— 204

**Гамалея,** Николай Федорович (1859—1949) — советский микробиолог.— 501

**Гамма** — последовательность тонов, входящих в октаву.— 103

**Гамма-квант** — наименьшая доза энергии гамма-лучей.— 354

**Гамма-лучи** — коротковолновые электромагнитные колебания, возникающие при радиоактивных превращениях.— 183, 275, 288, 289

**Ган,** Отто (р. 1879) — немецкий физик.— 283, 296, 547

**Гарт** — сплав свинца, сурьмы и олова.— 443

**Гаусс,** Карл Фридрих (1777—1855) — немецкий математик и физик.— 545

**Гейгер,** Ганс (1882—1945) — немецкий физик.—303

**Гейгера—Мюллера счетчик** — прибор, позволяющий регистрировать электрически заряженные частицы.—303

**Гейзенберг,** Вернер (р. 1901) — немецкий физик.— 282, 547

**Гей-Люссак,** Жозеф (1778—1850) — французский физик и химик.— 95, 150, 544, 545

**Гектар** — мера земельной площади = $10^4$ *м*$^2$.— 530

**Гель** — студнеобразное состояние растворов.— 417

**Гельмгольц,** Герман Людвиг Фердинанд (1821—1894) — немецкий естествоиспытатель.— 208, 545

**Гемоглобин** — сложный белок, красный пигмент крови.— 504

**Генератор ламповый** — устройство для получения электромагнитных колебаний с помощью электронных ламп.— 231

**Генератор электрического тока** — устройство для преобразования механической энергии в электрическую.— 208

**Геохимия** — наука о химическом составе пород Земли.— 345

**Гербициды** — химические средства для уничтожения сорняков.— 418, 467

**Герике,** Отто фон (1602—1686) — немецкий физик.— 201, 543

**Германий** — химический элемент № 32.— 382, 383, 450

**Герон Александрийский** (I в. н. э.) — древнегреческий ученый.— 543

**Герц** — единица частоты колебаний в СИ.— 221, 529

**Герц,** Генрих Рудольф (1857—1894) — немецкий физик.— 93, 213, 220, 529, 546

**Гесс,** Герман Иванович (1802—1850) — русский химик.— 167, 311, 545

**Гетеродин** — ламповый генератор электромагнитных колебаний.— 234

**Гетерополярная связь** — см. Ионная связь.

**Гиббс,** Джозайя Уиллард (1839—1903) — американский физик.— 165

**Гидравлический удар** — резкое изменение давления и скорости при движении жидкости.— 112

**Гидриды** — соединения химических элементов с водородом.— 330, 432—434

**Гидрогенизация** — присоединение водорода к другим веществам.— 508

**Гидродинамика** — наука о движении и действии жидкостей на обтекаемые ими тела.— 68

**Гидролиз** — разложение вещества водой.— 507, 546

**Гидроксильная группа** — ОН.—415, 479

**Гидроксоний**—ион $H_3O$. Образуется при соединении иона водорода с молекулой воды.— 429

**Гидролокатор** — прибор для обнаружения тел в воде или измерения глубины.— 110

**Гидрофильный** — проявляющий сильное взаимодействие с водой.— 414

**Гидрофобный**—проявляющий слабое взаимодействие с водой.—415

**Гипероны** — элементарные частицы с массой в 2182 раза большей, чем у электрона.— 268

**Гирокомпас** — компас, в котором магнит заменен на свободно подвешенный гироскоп.— 35

**Гироскоп** — прибор, основанный на свойстве вращающихся вокруг оси тел (волчков) сохранять направление оси вращения.— 35, 545

**Глюкоза** — углевод, простейший моносахарид.— 458, 507

**Глютаминовая кислота** — одна из аминокислот.— 504

**Голос моря** — инфразвук, возникающий в районе зарождения шторма.— 108

**Гормоны** — особые вещества живых организмов, регулирующие жизнедеятельность и обмен веществ.— 458, 497

**Гравитационная постоянная** — коэффициент в формуле закона всемирного тяготения.— 29

**Гравитация** (тяготение) — свойство материальных тел притягивать друг друга.— 29, 534

**Градус** — единица измерения температуры.— 529

**Грамм-моль** (грамм-молекула) — см. Моль вещества.

**Гран** — аптекарская мера массы = 0,062 *г*.— 531

**Гремучий газ** — взрывчатая смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода.— 398

**Громоотвод** — устройство для защиты от молний.— 544

**Гроттус,** Христиан Иоганн Дитрих (1785—1822) — литовский физик и химик.— 544

**Гук,** Роберт (1635—1703) — английский естествоиспытатель.— 543

**Гюйгенс,** Христиан (1629—1695) — голландский механик, математик и физик.— 267, 543

# Д

**Давление** — сила, действующая на единицу площади.— 145

**Давление акустическое** — давление, возникающее от звуковой волны в жидкости или газе.— 93

**Давление света.**— 546

**Дагеротип** — фотография на серебряной пластинке или стекле по методу Л. Ж. Дагера, одного из первых изобретателей фотографии.— 169

**Д'Аламбер,** Жан Лерон (1717—1783) — французский математик и философ.— 544

**Дальтон,** Джон (1766—1844) — английский химик и физик.— 544

**Датчик** — автоматическое устройство, воспринимающее воздействие извне и передающее сигнал измерительному прибору.— 51

**Двигатели авиационные:** турбореактивный.—72, прямоточный.— 73; турбовинтовой.— 73

**Двигатели будущего** (космические): ионный и фотонный — тяга должна создаваться за счет потока ионов или фотонов.— 33, 73, 74

**ДДТ** — препарат для уничтожения насекомых.— 418, 468

**Дёберейнер,** Иоганн Вольфганг (1780—1849) — немецкий химик.— 311

**Дезоксирибонуклеиновая кислота** (ДНК) — основная составная часть наследственного вещества в ядрах живых клеток.— 502—504, 547

**Дейтерий** — тяжелый изотоп водорода.— 18, 22, 277, 367, 368, 511, 514, 515

**Дейтрон** — ядро атома дейтерия.— 120

**Декарт,** Рене (1596—1650) — французский философ, математик и физик.— 543

**Декстрин.**—507

**Демокрит** (ок. 460—370 до н. э.) — древнегреческий философ.— 543

**Десенсибилизатор** — вещество, понижающее светочувствительность фотоматериала.— 462

**Десорбция** — выделение адсорбированного вещества с поверхности сорбента.— 387

**Десятина** — старая русская мера площади = = 10 925 *м*$^2$.— 531

**Детандер.**— 116

**Детектирование** — преобразование электромагнитных колебаний для выявления переданного сигнала.— 233, 234, 237, 254, 360, 388

**Детонация** — распространение химического процесса со скоростью, превышающей скорость звука.— 465, 466

**Дефект массы** — уменьшение массы при образовании атома из отдельных частиц — нуклонов за счет выделения энергии.— 122

**Дефекты твердого тела** — нарушения кристаллической структуры.— 373, 421—423

**Дефолианты** — вещества, вызывающие опадение листьев растений.— 467

**Деформации остаточные** — изменения формы тела, не исчезающие после прекращения действия внешней силы.— 423

**Децибел** — см. Бел.

**Деэмульгатор** — вещество, разрушающее эмульсию.— 419

**Джоуль** — единица работы, энергии и количества теплоты в СИ.— 528, 529

**Джоуль,** Джемс Прескотт (1818—1889) — английский физик.— 110, 152, 199, 529, 545

**Диамагнетики** — вещества, обладающие способностью выталкиваться из магнитного поля.— 117, 205, 216

**Дидро,** Дени (1713—1784) — французский философ.— 544

**Дина** — единица силы в СГС=$10^{-5}$ *н.*— 530

**Динамик** — электродинамический громкоговоритель.— 234

**Динатронный эффект** — появление вторичных электронов при бомбардировке анода лампы заряженными частицами.— 232

**Диод** — электронная лампа с двумя электродами.— 229, 234

**Диполь.**— 215, 433

**Дирак,** Поль Андриен Морис (р. 1902) — английский физик.— 270, 547

**Дисперсный** — раздробленный, рассеянный.— 413, 422, 424

**Дифракционная решетка** — оптический прибор, совокупность большого количества узких параллельных щелей в непрозрачном экране.— 174, 189

**Дифракция** — огибание преграды волнами.— 111, 187, 363, 543, 544

**Дифракция электронов.** — 267, 547

**Диффузионная камера** — прибор для обнаружения заряженных частиц.— 305

**Диффузия** — самопроизвольное выравнивание концентрации вещества в системе.— 412

**Диэлектрики** — вещества, почти не проводящие электрический ток.— 374

**Диэлектрическая проницаемость среды** — отношение сил взаимодействия электрических зарядов в среде к таким же силам в вакууме.— 210

**Длина волны** — расстояние между двумя точками волны, колеблющимися в одинаковой фазе.— 93

**Доза радиации** — количество энергии радиоактивных излучений, поглощенное телом или живым организмом в единице объема.— 57

**Доплер,** Христиан (1803—1853) — австрийский физик и астроном.— 99, 189

**Доплера эффект** — изменение воспринимаемой частоты колебаний при относительном движении источника и приемника волн.— 99, 100, 189

**Дросселирование** — искусственное сужение потока жидкости или газа в трубопроводе с последующим расширением.— 116

**Дроссель электрический.**— 233

**Дуанты** — ускоряющие электроды-камеры в циклотроне.— 358

**«Дырка»** — обозначение квантового состояния, не занятого электроном; в кристалле полупроводника ведет себя как положительный заряд.— 248

**Дырочные полупроводники** — полупроводники, в которых носители тока — «дырки».— 249, 375

**Дэви,** Гемфри (1778—1829) — английский химик и физик.— 206, 538, 544

**Дюйм** — английская мера длины = 2,54 *см.*— 531

**Дюлонг,** Пьер Луи (1785—1838) — французский физик и химик.— 545

**Дюма,** Жан Батист Андре (1800—1884) — французский химик.— 545

## Е

**Емкость электрическая** — характеристика системы проводников, мера величины заряда системы при заданном потенциале.— 225, 529

## Ж

**Жансен,** Пьер Жюль Сезар (1824—1907) — французский астроном.— 172, 315, 545

**«Желудь»** — миниатюрная радиоэлектронная лампа.— 235

**Жиры** — сложные эфиры глицерина и жирных кислот.— 505, 508

**Жолио-Кюри,** Ирен (1897—1956) — французский физик.— 283

**Жолио-Кюри,** Фредерик (1900—1958) — знаменитый французский физик.— 283, 547

**Жуковский,** Николай Егорович (1847—1921) — советский ученый.— 64, 67, 71, 72

## З

**Закрылки** — устройство на крыле самолета для увеличения подъемной силы и снижения посадочной скорости.— 75

**Запас плавучести** — способность корабля оставаться на плаву при крене.— 86, 90, 544

**Запоминающее устройство** — часть вычислительной машины, служащая для хранения закодированной информации.— 119

**Звуковой барьер** — граница скорости, за которой скорость самолета становится больше скорости звука.— 67, 68

**Зелинский,** Николай Дмитриевич (1861—1953) — советский химик-органик.— 465, 547

**Зинин,** Николай Николаевич (1812—1880) — русский химик-органик.— 459, 545

**Золотник** — старинная русская мера веса = 4,266 *г.*— 531

**Зонная плавка** — метод очистки веществ от примесей.— 249

**Зрительная труба** — оптическая система для наблюдения удаленных предметов.— 196

## И

**Иваненко,** Дмитрий Дмитриевич (р. 1904) — советский физик.— 282, 547

**Идеальный газ** — воображаемый газ, молекулы которого являются материальными точками — не имеют размера и взаимодействуют между собой только механически.— 139, 528

**Изобары** (в ядерной физике) — атомы с разным числом протонов, но с одинаковым числом нуклонов (массой).—289

**Изоляторы** — вещества с очень высоким электрическим сопротивлением.— 203, 246, 263, 374

**Изомеры** — соединения одинакового химического состава, но с различным строением молекулы.— 289, 353, 361, 395, 470, 545, 547

**Изоморфизм** — способность атомов или молекул замещать друг друга в кристаллах, при этом образуются соединения переменного состава.— 545

**Изотактические полимеры.**— 479

**Изотермический процесс** — процесс, происходящий при постоянной температуре.— 94, 141

**Изотопы** — разновидности атомов одного элемента с одинаковым зарядом ядра, но с различными массовыми числами.— 276, 282, 289, 319, 342, 357, 382, 453, 546, 547

**Изотропность** — совпадение физических свойств вещества во всех направлениях.— 25

**Инверсионная температура** — температура, выше которой реальный газ при дросселировании не охлаждается.— 116

**Ингибитор** — вещество, замедляющее химическую реакцию.— 402

**Индиго** — краситель ярко-синего цвета.— 459

**Индуктивности катушка** — провод, свернутый спиралью или намотанный на катушку.— 205, 221

**Индукция электромагнитная** — возбуждение электрического тока при изменении магнитного поля.— 206, 207, 210, 545

**Индуцированное излучение** — электромагнитное поле, излучаемое атомами под воздействием внешнего электромагнитного поля.— 547

**Инерция** — свойство тела сохранять равномерное прямолинейное движение или состояние покоя, если на него не действует внешняя сила.— 543

**Инсектициды** — химические средства для уничтожения насекомых.— 468

**Инсулин** — гормон поджелудочной железы.— 499

**Интерференция волн** — взаимодействие волн между собой; в зависимости от фазы волны могут усиливаться или погашаться.—185—188, 544

**Интерферометр** — оптический измерительный прибор, основанный на интерференции волн света.— 186, 187, 525

**Инфразвук** — звуковые волны с низкой частотой— меньше 16 *гц*.— 93, 108

**Инфракрасные лучи** — электромагнитное излучение с длиной волны от 0,75 *мк* до 0,5 *мм*.— 176, 192

**Ионизационная камера** — прибор для обнаружения ионизирующих излучений.— 303

**Ионизация** — процесс образования в веществе ионов.— 303, 365, 366, 409

**Ионная связь** — химическая связь, обусловленная притяжением избыточных зарядов противоположно заряженных частей молекулы — ионов.— 427

**Ионообменные смолы** — твердые вещества, обладающие способностью обменивать свои ионы на другие, имеющиеся в жидкости (растворе).— 390, 492

**Ионосфера** — часть атмосферы, лежащая выше 60 *км*.— 223, 365—367

**Ионы** — электрически заряженные частицы, атомы или группы атомов, присоединившие или потерявшие электроны.— 263, 303, 365

**Иоффе,** Абрам Федорович (1880—1960) — советский физик.— 246, 547

**Иприт** — чрезвычайно ядовитое, содержащее серу органическое соединение, отравляющее вещество.— 504

**Иразер** — усилитель инфракрасных лучей, действующий на основе эффекта индуцированного излучения.— 241

# К

**Кавендиш,** Генри (1731—1810) — английский физик и химик.— 200, 539, 544

**Кавитация** — образование мельчайших пустот в жидкости.— 112

**Казеин** — один из основных белков молока.— 510

**Калифорний** — искусственно полученный химический элемент № 98.— 341, 392, 542, 547

**Калория** — единица тепловой энергии = 4,187 *дж*.— 529, 530

**Камера-обскура** — оптический прибор с малым отверстием вместо линзы.—169

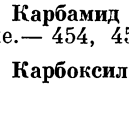
**Камерлинг-Оннес,** Гейке (1853—1926)—голландский физик.— 117, 546

**Капица,** Петр Леонидович (р. 1894) — советский физик.— 119, 547

**Капрон** — синтетическое волокно высокой прочности.— 480

**Карат** — единица веса драгоценных камней = 0,2 *г*.— 531

**Карбамид** — $CO(NH_2)_2$ — искусственное удобрение.— 454, 455

**Карбоксильная группа** —  — группа, входящая в состав органических кислот.— 415, 471, 479

**Карбонаты** — соли угольной кислоты.— 431

**Карман,** Теодор фон (1881—1963) — немецкий гидромеханик.— 67

**Карно,** Никола Леонар Сади (1796—1832) — французский физик и инженер.— 154, 545

**Каскад усиления** — электрическое устройство для повышения мощности колебаний.— 234

**Катализ** — ускорение химической реакции под влиянием небольших добавок веществ — катализаторов, не изменяющихся в процессе реакции.— 261, 348, 401, 402, 409, 424, 544, 545, 546

**Катион** —ион, положительно заряженный.— 416

**Катод** — отрицательный электрод.— 229

**«Катюша»** —советский реактивный миномет.— 38

**Качественный анализ** — совокупность методов, применяемых для определения химического состава вещества.— 379, 381

**Квант** — минимальное количество энергии, излучаемое или поглощаемое атомом.— 177, 178, 218, 239, 267, 272, 375, 402, 546

**Квантовая механика.**— 177, 239, 267, 327, 547

**Квантовая электроника.**— 240

**Квантовые числа** — главное, побочное, магнитное, спиновое — определяют строение электронной оболочки атома.— 323—325

**Квантовый переход** — изменение энергетического состояния атомов или молекул вещества.— 245

**Квантовый световой генератор** — см. Лазер.

**Квантовый усилитель** — прибор для усиления электромагнитной волны за счет запасенной энергии атомов вещества, через которое проходит импульс излучения.— 240

**Кварки** — гипотетические частицы, из которых, может быть, состоят все известные науке элементарные частицы.— 356

**Кекуле,** Фридрих Август (1829—1896) — немецкий химик.— 460, 545

**Кельвин** (Томсон), Уильям (1824—1907) — английский физик.— 114, 178, 545, 546, 547

**Кельвина шкала** — шкала абсолютной температуры.— 160, 528, 545

**Кенотрон** — электровакуумный выпрямитель тока.— 253

**Кеплер,** Иоганн (1571—1630) — немецкий астроном.— 177, 543

**«Керн»** — гипотетическое уплотнение массы в центре атомного ядра.— 290

**Килограмм** — основная единица массы в СИ.— 525

**Килограмм-сила** — единица измерения силы.—525, 526.

**Кинескоп** — приемная электроннолучевая телевизионная трубка.—192

**Кинетика химическая** — учение о скоростях и механизмах химических процессов.—398, 407

**Кинетическая энергия** — энергия движущегося тела.—271

**Кирхгоф,** Густав Роберт (1824—1887) — немецкий физик.—172, 347, 380, 540, 545

**Кислоты** — соединения, содержащие водород, способный замещаться на металл.—431—433, 440, 471

**Клапейрон,** Бенуа Поль Эмиль (1799—1864) — французский физик.— 138, 139

**Клатратные соединения** — образуются без участия валентных связей, в результате механического внедрения одних молекул в полости других сложных молекул.— 331

**Клаузиус,** Рудольф (1822—1888) — немецкий физик.—161, 545, 547

**Клетчатка** (целлюлоза) — углевод, составляющий основу оболочек растительных клеток.—458

**Клистрон** — высокочастотная электронная лампа.— 236

**Коагуляция** — слипание частиц в дисперсных системах.—503

**Когерер.**— 220

**Когерентные колебания** — колебания, способные к взаимной интерференции, происходящие в одной фазе.— 186, 239

**Колебания вынужденные** — колебания, возникающие при периодическом действии внешней силы.—226

**Колебательный контур** — замкнутая электрическая цепь, поглощающая энергию электромагнитных колебаний только определенной частоты.—221, 226, 227

**Коллиматор** — устройство для получения пучка параллельных лучей.—172

**Коллоидный раствор** — дисперсная система, состоящая из взвешенных в жидкости частиц размером от $10^{-5}$ до $10^{-7}$ *см*.—417

**Колонна синтеза** — стальной цилиндр, в котором под высоким давлением идет синтез какого-либо вещества.—133

**Колонна хроматографическая** — трубка с сорбентом, прибор для химического анализа или разделения сложных смесей.—386, 387

**Комбинаторика** — раздел математики, изучающий перестановки, размещения и сочетания.—328

**Коммутатор** — переключатель электрического тока.—209

**Компрессор** — аппарат для сжатия и перемещения газа под избыточным давлением.—128

**Конвекция** — перемещение массы жидкости или газа под действием внешних сил, разности давлений или температур.—178

**Конверсия внутренняя** — одна из форм радиоактивного превращения атомов.—289

**Конденсатор электрический** — устройство, запасающее электрический заряд.—221, 231

**Консонанс** — согласованное сочетание звуков.—103

**Конструкционные материалы** — материалы для строительства и машиностроения.—487

**Координационная связь.**—429

**Коперник,** Николай (1473—1543) — польский астроном.—543

**Кориолис,** Густав Гаспар (1792—1843) — французский физик.—30

**Кориолиса сила** — дополнительная сила инерции при движении тела во вращающейся системе.—30, 31

**Корпускулы** — общее название частиц материи.— 191

**Корпускулярная теория** — представление о свете как о потоке частиц.—543

**Корпускулярное излучение Солнца** — поток элементарных заряженных частиц, испускаемых Солнцем, в основном протонов.—44, 48

**Коррозия металлов** — разрушение, окисление, растворение металлов под действием окружающей среды.—397, 398, 407

**Космическая ракета** — ракета, способная преодолеть земное притяжение, развивающая скорость свыше 8 *км/сек*.— 45

**Космическая скорость: первая** — скорость, которую необходимо сообщить телу, чтобы оно совершало движение вокруг Земли по круговой орбите,—8 *км/сек*.— 42, 530; **вторая** — скорость, необходимая телу для полного преодоления притяжения Земли,—11,2 *км/сек*.— 530

**Космическая химия** — новая наука, изучающая химический состав космических тел и межпланетной среды и происходящих в них химических реакций.—351

**Космические лучи** — непрерывный поток элементарных частиц и электромагнитных излучений, падающих на Землю из космоса.—264, 356

**Коссель,** Вальтер (1888—1956) — немецкий физик.—547

**Коэффициент воспроизводства ядерного горючего** — отношение количества плутония, получаемого в атомном реакторе, к количеству затраченного урана.—302

**Коэффициент полезного действия** — отношение количества полезной энергии, получаемой от ее преобразователя, к энергии затраченной.—156, 405

**Коэффициент размножения нейтронов** — среднее число нейтронов, возникающих взамен каждого нейтрона, вызвавшего деление ядра.—298, 299

**Крабовидная туманность** — звездная туманность в созвездии Тельца.— 352, 368

**Красное смещение** — смещение спектральных линий, наблюдаемых в спектрах звезд и туманностей.—188

**Крахмал.**—506

**Крекинг** — превращение сложных высокомолекулярных углеводородов в низкомолекулярные.—465

**Криотрон** — элемент схемы электронносчетной машины, работает на использовании эффекта сверхпроводимости.—118

**Кристадин** —радиоприемник с кристаллическим детектором.—254

**Кристаллическая решетка** — правильное расположение атомов, ионов и молекул в кристалле.—247, 372

**Кристаллогидраты** — кристаллические вещества, содержащие воду.—396

**Кристаллы** — твердые вещества, способные образо-

вывать естественную форму правильного многогранника.—362, 370, 546

**Критическая масса** — наименьшее количество ядерного горючего, при котором становится возможной цепная ядерная реакция.—299

**Критическая температура** — температура, при которой жидкость и пар обладают одинаковыми свойствами.—545

**Крукс,** Уильям (1832—1919) — английский физик и химик.—303, 316, 536

**Крутильные весы** — прибор для измерения малых сил по закручиванию тонкой нити.—199, 200, 544

**Крылов,** Алексей Николаевич (1863—1945) — советский кораблестроитель и математик.—90

**Кулон** — единица количества электричества в СИ.—529

**Кулон,** Шарль Огюстен (1736—1806) — французский физик.—199, 206, 529

**Кулона закон:** сила, с которой взаимодействуют два точечных заряда, прямо пропорциональна их произведению и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.—200, 210

**Курнаков,** Николай Семенович (1860—1941) — советский химик.—546

**Курчатов,** Игорь Васильевич (1903—1960) — советский физик.—473, 547

**Кусто,** Жак Ив (р. 1910) — французский океанолог.—86

**Кэрозерс,** Уоллес (1896—1937) — американский химик, создавший нейлон.—547

**Кюри,** Мария — см. Склодовская-Кюри.

**Кюри,** Пьер (1859—1906) — французский физик и химик.—109, 199, 274, 317, 546

**Кюри точка** — температура, при которой ферромагнетики теряют способность намагничиваться.—199

**Кюрий** — искусственно полученный химический элемент № 96.—392

# Л

**Лавировка** — движение парусного судна против ветра по ломаной линии.—92

**Лавсан** — синтетическое волокно.—480

**Лавуазье,** Антуан Лоран (1743—1794) — французский химик.—459, 544

**Лазер** — усилитель индуцированного светового излучения.—180, 181, 219, 241

**Ландау,** Лев Давидович (р. 1908) — советский физик.—119, 368

**Ландсберг,** Георгий Самуилович (1890—1957) — советский физик.—547

**Ланжевен,** Поль (1872—1946) — французский физик.—109

**Лантаноиды** — 15 химических элементов III группы периодической таблицы.—331—333, 391, 451—453

**Лаплас,** Пьер Симон (1749—1827) — французский астроном, математик и физик.—95, 150

**Лауэ,** Макс Феликс Теодор (1879—1960) — немецкий физик.—546

**Лебедев,** Петр Николаевич (1866—1912) — русский физик.—177, 213

**Лебедев,** Сергей Васильевич (1874—1934) — советский химик-органик.—472, 475

**Левенгук,** Антони ван (1632—1723) — голландский биолог.—533, 543

**Левкип** (V в. до н. э.) — древнегреческий философ.—543

**Лейденская банка** — электрический конденсатор в виде банки.—544

**Лекарственные вещества.**—463, 464

**Лекок де Буабодран,** Поль Эмиль (1838—1912) — французский химик.—314, 452, 545

**Ленц,** Эмилий Христианович (1804—1865) — русский физик.—206, 545

**Ленца правило.**—206, 208

**Лептоны** — группа легких элементарных частиц.—268

**Лесохимия** — раздел науки, изучающий химические свойства древесины.—464

**Ле Шателье,** Анри Луи (1850—1936)— французский физико-химик.—546

**Ле Шателье принцип.**—400, 546

**Либих,** Юстус (1803—1873) — немецкий химик.—545

**Ливень элементарных частиц** — множественное рождение новых элементарных частиц в результате столкновения частицы космических лучей с атомами атмосферы.—267

**Линза** — прозрачное тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями.—172

**Липазы** — ферменты.—508

**Листер,** Джозеф (1827—1912) — английский хирург.—494

**Ловиц,** Товий Егорович (1757—1804) — русский химик и фармацевт.—544

**Лодыгин,** Александр Николаевич (1847—1923) — русский электротехник.—204

**Локатор** — прибор, определяющий местонахождение тела по регистрации отраженных от него электромагнитных волн.—243

**Локьер,** Джозеф Норман (1836—1920) — английский астрофизик.—172, 315, 545

**Ломоносов,** Михаил Васильевич (1711—1765) — великий русский физик, химик, философ и поэт.—145, 166, 459, 544

**Лоренц,** Гендрик Антон (1853—1948) — голландский физик.—214

**Лоренца сила** — сила, действующая на заряженную частицу, которая движется в магнитном поле.—215

**Лосев,** Олег Владимирович (1903—1942) — советский физик.—254

**Лоуренс,** Эрнест Орландо (1901—1958) — американский физик.—342

**Лоуренсий** — искусственно полученный химический элемент № 103.—342, 392

**Лошадиная сила** — единица мощности = 75 *кгс/сек* = = 0,736 *квт.*—72, 530

**Лукреций,** Тит Лукреций Кар (ок. 99—55 до н. э.) — древнеримский философ и поэт.—543

**Лунин,** Николай Иванович (1854—1937) — советский биохимик.—497

**Лучепреломление** — отклонение направления луча при переходе его из одной среды в другую.—543

**Лье** — старинная французская мера длины = =4,5 *км.*— 531

**Льюис,** Гилберт Ньютон (1875—1946) — американский физико-химик.—547

**Люкс** — единица освещенности в СИ.—529

**Люмен** — единица светового потока в СИ.—529

**Люминесценция** — свечение тела, избыточное по сравнению с температурным излучением. — 181, 183

**Люминофоры** — вещества, в которых возникает люминесценция.—239, 252

**Ляпунов,** Александр Михайлович (1857—1918) — русский математик и механик.—77

# М

**Магические числа** — числа протонов или нейтронов атомного ядра, при которых наблюдаются резкие изменения ядерных свойств.—343, 344

**Магнетрон** — двухэлектродная электронная лампа с магнитным полем.—235

**Магнитная буря** — большие неправильные колебания магнитного поля Земли.—367

**Магнитная ловушка** (магнитная бутылка) — аппарат, в котором горячая плазма удерживается при помощи магнитного поля.—123

**Магнитная масса** — мера количества магнетизма в полюсах магнита.—200

**Магнитная постоянная вакуума.**—208

**Магнитное давление** — сила действия магнитного поля на плазму.—366

**Магнитное поле.**—367, 544

**Магнитное поле Земли.**—367, 543

**Магнитный момент.**—216

**Магнитострикция** — изменение формы тела при намагничивании.—110, 199

**Магнитофон** — прибор для записи и воспроизведения звуков.— 108

**Мазер** — усилитель индуцированного излучения радиоволн.—17, 219, 241

**Майер,** Юлиус Роберт (1814—1878) — немецкий ученый.—151, 545

**Майкельсон,** Альберт Абрахам (1852—1931) — американский физик.—33, 170, 171, 187, 213, 546, 547

**Максвелл,** Джемс Клерк (1831—1879) — английский физик.—171, 177, 196, 210—214, 220, 545

**Мандельштам,** Леонид Исаакович (1879—1944) —советский физик.—214, 547

**Маргарин** — искусственный пищевой жир, получается гидрогенизацией растительных масел.—508

**Мариотт,** Эдм (1620—1684) — французский физик.—543

**Марковников,** Владимир Васильевич (1838—1904)—русский химик.—545

**Маркони,** Гульельмо (1874—1937) — итальянский радиотехник.—221

**Масса** — мера инерции тел и их гравитационных свойств.—526

**Масс-спектрометрический анализ** — метод измерения массы изотопов и изотопного состава вещества.—383

**Материя** — философская категория для обозначения объективной реальности. Одна из форм материи — вещество.—362, 370

**Мах,** Эрнст (1838—1916) — австрийский философ и физик.—68

**Маха число** — отношение скорости движущегося тела к скорости звука.—68, 530

**Маятник** — твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной оси.—31, 543, 545

**Маячковая лампа** — электронная радиолампа.—235

**Мегагерц** — миллион герц.—221

**Мегаэлектрон-вольт** — миллион электрон-вольт — единица энергии.—529

**Международная система единиц** (СИ).—524—531

**Международный геофизический год** (МГГ) — период с 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г., когда ученые 65 стран проводили исследования геофизических процессов на Земле.—42

**Междуузлия** — пространство между атомами в кристаллической решетке.—372

**Мезоатом** — атом, в котором один из электронов замещен мезоном.—354

**Мезонная шуба** — гипотетическое окружение нуклонов мезонами в ядре атома.—273

**Мезоны** — элементарные частицы.—20, 268, 277, 354, 547

**Мейер,** Юлиус Лотар (1830—1895) — немецкий химик.—311

**Мейтнер,** Лизе (р. 1878) — немецкий физик.—542

**Менделевий** —искусственно полученный химический элемент № 101.— 101, 341, 357, 392, 542, 547

**Менделеев,** Дмитрий Иванович (1834—1907) — великий русский химик.—307—315, 452, 474, 545, 546

**Меншуткин,** Николай Александрович (1842—1907)— русский химик.—308

**Мёссбауэр,** Рудольф Людвиг (р. 1929) — немецкий физик.—548

**Метагалактика** — совокупность галактик, доступных современным телескопам.—267

**Метацентр** — точка пересечения выталкивающей силы с плоскостью симметрии плавающего тела.— 89

**Метиловый спирт.**—470

**Метр** — основная мера длины в СИ.—525

**Метрическая система измерения** — система, в основу которой положены метр, килограмм и десятичное счисление.—525, 544

**Механика физико-химическая.**—424, 425

**Механики основные законы** — законы Ньютона.—543

**Механический эквивалент тепла.**—152

**Микрометр** — инструмент, измеряющий длину с точностью до 1 микрона и менее.—360

**Микромодуль** — миниатюрная радиодеталь полупроводников.—257

**Микрон** — тысячная доля миллиметра.—529

**Микроскоп ультрафиолетовый** — микроскоп, действующий с применением ультрафиолетовых лучей.—195, 196

**Микрофон** — прибор, преобразующий звуковые колебания в электрические.—105

**Милликен,** Роберт Эндрус (1868—1953) — американский физик.—214, 546

**Миля**—английская мера длины; сухопутная миля= 1,609 *км*, морская = 1,853 *км*.—531

**Митчерлих,** Эйльхард (1794—1863) — немецкий химик.—545

**Мицеллы** — частицы в коллоидных растворах.—417.

**Мишметалл** — сплав церия и железа.—453

**Модели атома:** капельная.— 287, оболочечная.— 286, Резерфорда—Бора.—216, 280, 546, Томсона.— 546

**Модуляция** — управляемое изменение амплитуды радиоволн или частоты их колебаний.—105, 224, 233

**Мозли,** Генри (1887—1915) — английский физик.—320, 546

**Молекула.**—262, 362, 468, 516, 517

**Молекулярное сцепление** — взаимное притяжение молекул.—412

**Молекулярные спектры** — полосатые оптические спектры излучений, создаваемых или поглощаемых молекулами.—166

**Молочный сахар** — углевод.—510

**Моль вещества** — число граммов вещества, равное его молекулярному весу.—138, 139, 415

**Монгольфье,** Жозеф (1740—1810) и Этьенн (1745—1799) — французы, изобретатели воздушного шара.—65

**Монокристалл** — одиночный кристалл, обладает правильным строением во всей массе.—371

**Мономеры** — вещества, молекулы которых способны соединяться в полимеры.—475

**Мономолекулярный слой** — слой на границе тел, толщиной в одну молекулу.—413, 420
**Монохроматический луч** — состоящий из излучений с одинаковой длиной волны.—171
**Морзе,** Самюэль (1791—1872) — американский изобретатель.—221
**Мотор-генератор** — машина, преобразующая переменный ток в постоянный (и наоборот).—253
**Моющие вещества.**—416
**Муассан,** Анри (1852—1907) — французский химик.—536
**Мыла** — щелочные соли высокомолекулярных жирных кислот.—416, 417
**Мюон** (мю-мезон) — элементарная частица.—268, 272
**Мягкая посадка** — способ постепенного преодоление силы тяжести при посадке ракеты на небесное тело.—55, 62, 63

## Н

**Направленный синтез** — построение молекул по заранее составленному плану.—472
**Напряжение запирания** — отрицательное напряжение на сетке триода, прекращающее поток электронов к аноду.—230
**Напряжение механическое** — мера внутренних сил, возникающих в твердом теле в результате внешних воздействий.—424
**Напряженность магнитного поля.**— 529
**Напряженность электрического поля.**— 209, 529
**Невесомости состояние.**—28, 58—60
**Нейтрино** — элементарная частица.—120, 267, 268, 271, 272, 286, 352, 356, 547, 548
**Нейтрон** — элементарная частица.—263, 266, 271, 282, 283, 297, 306, 307, 361, 368, 547
**Нейтроны запаздывающие** — образуются не сразу при делении ядра урана, а при распаде некоторых изотопных ядер в цепочках распада осколочных ядер— поэтому запаздывают.—299
**Некогерентные колебания** — колебания, неспособные к интерференции, происходящие в разных фазах, беспорядочно.—240
**Непредельные** (ненасыщенные) — органические вещества, углеродные атомы в молекулах которых связаны между собой двойными или тройными связями.—476
**Нептуний** — искусственно полученный химический элемент № 93.—340
**Нернст,** Вальтер Герман (1864—1941) — немецкий физик.— 166, 546
**Нестеров,** Петр Николаевич (1887—1914) — русский военный летчик.—77
**Ниепс де Сен-Виктор,** Клод (1805—1870) — французский изобретатель.—275
**Нильсон,** Ларс Фредерик (1840—1899) — шведский химик.—315, 546
**Нит** — единица яркости в СИ.—529
**Нитробензол.**—459
**Нитрон** (орлон) — синтетическое волокно.—478
**Нихром** — сплав никеля, хрома и железа.—443
**Новокаин** — обезболивающее средство.—496
**Нуклеиновые кислоты и нуклеотиды** — сложные органические соединения, входящие в состав ядер клеток живых организмов.—21, 458, 502
**Нуклоны** — общее название протонов и нейтронов.—268, 290
**Нулевая энергия** — энергия, которой обладает физическая система в наинизшем энергетическом состоянии.—148
**Ньюлендс,** Джон Александер (1838—1898) — английский химик.—311
**Ньютон** — единица силы в СИ.—528
**Ньютон,** Исаак (1643—1727) — английский физик, астроном и математик.—24—32, 94, 171, 173, 197, 200, 267, 381, 529, 543
**Ньютона сила** — сила тяготения.—214

## О

**Обертон.** —101
**Оболочка электронная** — совокупность электронных орбит одного энергетического уровня.—323—325, 329
**Обратной волны лампа.**— 236
**Объединенный институт ядерных исследований** — научно-исследовательский институт, в котором работают физики из стран социалистического содружества, находится в г. Дубне.—269
**Окисление электрохимическое** — окисление вещества при электролизе.—409
**Окислы амфотерные** — вещества, которые проявляют в зависимости от условий то кислотные, то основные свойства.—440
**Октава** — звуковой интервал, объединяющий 12 полутонов.—103.
**Октановое число** — показатель антидетонационных свойств бензина.—466
**Окуляр** — часть оптической системы, обращенная непосредственно к глазу.—173
**Ом** — единица электрического сопротивления в СИ.—529
**Ом,** Георг Симон (1787—1854) — немецкий физик.—204, 545
**Омега — минус частица** — одна из элементарных частиц.—269
**Оптические изомеры** — вещества, которые при одинаковом химическом и структурном составе обладают зеркально противоположным строением.—395
**Орбитальный захват** — поглощение ядром электрона с ближайшей оболочки.—285, 286
**Ортохроматические пластинки** — фотопластинки с повышенной чувствительностью к зеленому и желтому цветам.—462
**Освещенность** — величина светового потока, приходящегося на единицу поверхности.—180, 529
**Осколки ядерного деления.**—357
**Оствальд,** Вильгельм Фридрих (1853—1932) — немецкий физико-химик и философ.—546
**Остойчивость** — способность судна возвращаться в положение равновесия.—88
**Относительности теория.** — 32—34, 170, 265, 271, 546

## П

**Пальчиковая лампа** — компактная радиолампа, пригодная для усиления высоких частот.— 234.
**Панхроматические фотоматериалы** — фотопластинки (пленки), чувствительные ко всем цветам видимого света.—462
**Папалекси,** Николай Дмитриевич (1880—1947) — советский физик.—214, 547
**Парамагнетики** — вещества, обладающие способностью втягиваться в магнитное поле.—205, 216

**Парафины** — предельные углеводороды.—415

**Парацельс,** Филипп Ауреол Теофраст Бомбаст фон Гогенгейм (1493—1541) — немецкий врач и естествоиспытатель.—543

**Парсек** — астрономическая единица расстояния = $3{,}084 \cdot 10^{16}$ *м*.—530

**Паск** — противотуберкулезный препарат.—495, 496

**Паскаль,** Блез (1623—1662) — французский математик, физик и философ.—82, 543

**Паули,** Вольфганг (1900—1958) — швейцарский физик.—327, 547

**Пенициллин** — лекарственный препарат, антибиотик.—496, 547

**Пеногаситель** — вещество, разрушающее пену.—419

**Пенополимеры.**—488

**Пепсин** — фермент желудочного сока.—509

**Перегрузки сила** — сила, возникающая при движении тела с ускорением против направления силы тяжести.—29, 58, 77

**Переменный ток** — электрический ток с периодически меняющимися величиной и направлением.—208

**Переохлажденная жидкость** — жидкость, охлажденная ниже температуры замерзания.—521

**Перигелий** — точка орбиты небесного тела, наиболее близкая к Солнцу, или спутника — к Земле.—44

**Период колебаний** — промежуток времени, через который повторяются фазы колебания.—31, 94

**Период полураспада** — время, в течение которого распадается половина атомов радиоактивного вещества.—266, 278, 382

**Перкин,** Уильям Генри (1838—1907) — английский химик-органик.—459

**Петров,** Василий Владимирович (1761—1834) — русский физик.—203, 204, 544

**Пикар,** Огюст (1884—1962) — швейцарский физик, исследователь стратосферы.—86

**Пикофарада** — единица электрической емкости = $10^{-12}$ *ф*.—530

**Пилотаж высший** — сложный маневренный полет на самолете.—77

**Пион** (пи-мезон) — элементарная частица.—268

**Пироксилин** — взрывчатое вещество.—464

**Пирометр** — прибор для измерения высоких температур.—251

**Пифагор** (ок. 580—500 до н. э.)— древнегреческий философ и математик.—543

**Плавиковая кислота** — водный раствор фтористого водорода.—361

**Плавучесть** — способность корабля оставаться на плаву при крене.—86, 90, 544

**Плазма** — состояние вещества.—120, 123, 365

**Плазмотрон** — устройство для проведения химических реакций в плазме.—368

**Плазмохин и плазмоцид** — противомалярийные препараты.—495

**Планк,** Макс Карл Эрнст Людвиг (1858—1947) —немецкий физик.—150, 177, 217, 546

**Планка постоянная.**— 177, 178, 218

**Платинит** — сплав железа и никеля.—443

**Платон** (427—347 до н. э.) — древнегреческий философ.—543

**Плотность тела.**—84, 85

**Плутоний** — радиоактивный химический элемент № 94.—357, 359

**Победит** — сплав карбида вольфрама с кобальтом.—446

**Поверхностно-активное вещество** — вещество, понижающее поверхностное натяжение.—414, 423, 424

**Поверхностное натяжение** — сила, стремящаяся сократить поверхность тел. Вызывается притяжением молекул поверхности внутрь вещества.—413, 414, 522

**Подъемная сила.**—66

**Позитрон** — элементарная частица.—266, 268, 272, 283, 353, 547

**Позитроний** — атом, состоящий из электрона и позитрона.—353, 547

**Позитронный распад** — радиоактивный распад, сопровождающийся вылетом позитронов.—283

**Пойнтинг,** Джон Генри (1852—1914) — английский физик.—213, 546

**Полиакрилаты** — синтетические полимеры.—491

**Полиакрилонитрил** — полимер, продукт полимеризации акрилонитрила.—477

**Полиамиды** — синтетические полимеры.—491

**Поливинилхлорид** — синтетический пластический материал.—476, 478

**Поликонденсация.**—479—480

**Полимеризация.**—479, 481

**Полимер** — высокомолекулярное вещество, молекулы которого состоят из большого числа повторяющихся звеньев.—455, 473—492.

**Полиморфные модификации** — различные формы кристаллического строения у одного и того же вещества.—131

**Полинг,** Лайнус Карл (р. 1901) — американский химик.—547

**Полипропилен** — полимер, продукт полимеризации пропилена.—467

**Полисахариды** — сложные углеводы.—458

**Полиуретаны** — полимеры, которые используются для получения износостойких каучуков и пористых материалов.—484

**Полиэтилен** — полимер, продукт полимеризации этилена.—476

**Полоний** — радиоактивный химический элемент № 84.—541, 546

**Полоса пропускания** (в радиотехнике) — ширина спектра частот, необходимого для неискаженного воспроизведения сигнала.—234

**Полупроводники.**—203, 249, 374, 375, 547

**Полупроводниковые холодильники.**—258

**Поляризация света.**—213, 215, 544, 545

**Полярное сияние** — свечение верхних слоев атмосферы, вызываемое потоком космических частиц.—366, 367

**Полярограф** — прибор, в котором изучаются химические процессы с помощью электрохимических характеристик.—407

**Полярографический анализ** — метод электрохимического исследования растворов.—547

**Попов,** Александр Степанович (1859—1905) — русский физик, изобретатель радио.—105, 220, 244, 367, 546

**Порог слышимости** — наименьшая сила звука, воспринимаемая человеком.—99

**Порошковая металлургия** — изготовление металлических деталей из порошков металлов.—424

**Постоянства состава закон:** каждое химическое соединение, независимо от того, как оно получено, состоит из одних и тех же химических элементов, соединенных в одних и тех же весовых отношениях.—377, 544

**Потенциал электрического поля** — работа, совершаемая полем при перемещении единичного положительного заряда в удаленную точку, где потенциал полагают равным нулю.—529

**Поток плотности энергии** — количество энергии, переносимой излучением через единицу площади в единицу времени.—97, 213, 545, 546

**Прандтль,** Людвиг (1875—1953) — немецкий физик.—67

**Праут,** Уильям (1785—1850) — английский врач и химик.—544

**Предельные** (насыщенные) **углеводороды.**—476

**Преломление света** — изменение направления световых волн, когда они проходят через границу двух сред.—172, 543

**Прецессия** — движение оси вращения твердого тела, при котором эта ось описывает круговую коническую поверхность.—34

**Пристли,** Джозеф (1733—1804) — английский химик и философ.—544

**Пробкотрон** — установка, в которой плазма удерживается с помощью магнитных полей особой конфигурации (магнитных пробок).—124, 125

**Проводники** — вещества, хорошо проводящие электрический ток.—203, 246, 374, 544

**Прометий** — искусственно полученный химический элемент № 61.—285, 541

**Промоторы** — вещества, усиливающие активность катализатора.—401

**Пропилен** — органическое соединение, ненасыщенный углеводород.—466, 467

**Протий** — самый легкий изотоп водорода.—277, 511, 514

**Протон** — элементарная частица.—263, 266, 271, 547

**Протуберанцы** — облака или выбросы светящихся газов над поверхностью Солнца.—172

**Прохоров,** Александр Михайлович (р. 1916) — советский физик.—547

**Птолемей,** Клавдий (II в. н. э.) — древнегреческий астроном и географ.—543

**Пуассон,** Симеон Дени (1781—1840) — французский математик и физик.—94, 186, 544

**Пуд** — старинная русская мера веса = 16,38 *кг*.—531

**Пузырьковая камера** — прибор для наблюдения траекторий заряженных частиц.—306

**Пьезокварц.** —134

**Пьезоэлектрический эффект** — появление электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов, подвергаемых изгибу или сжатию.—51, 109, 372, 546

**Пядь** — старинная русская мера длины =19,98 *см*.—531

# Р

**Равновесия константа.**—399

**Радиации пояс**— окружающее Землю пространство, в котором магнитным полем Земли концентрируются заряженные частицы космических излучений.—57

**Радиационная опасность** — вредное действие радиоактивных излучений на живой организм.—57

**Радиационная химия** — наука о химических превращениях вещества под действием излучения.—404

**Радиационный крекинг** — расщепление тяжелых углеводородов или нефти под действием гамма-излучений.—404

**Радий** — химический элемент № 88.—276, 277, 542, 546

**Радикалы свободные** (химические) — высокоактивные осколки молекул, обладающие свободной, ненасыщенной химической связью.—347, 351

**Радиоактивная вилка** — боковое ответвление в цепи превращений радиоактивного семейства.— 285

**Радиоактивность** — самопроизвольное превращение химического элемента в другой элемент, сопровождающееся испусканием заряженных частиц или излучением электромагнитной энергии.—274, 344, 546, 547

**Радиоактивные семейства** — цепочки радиоактивных химических элементов, возникающих последовательно в результате ядерных превращений.—277

**Радиоволна в 21 *см*** — «голос водорода» — электромагнитное излучение, испускаемое атомами водорода в межзвездном пространстве.—350

**Радиоволны.**—222, 546, 547

**Радиоизотопы**— радиоактивные изотопы химических элементов (см. Радиоактивность).—301

**Радиолокация** — обнаружение тел и их местоположение по регистрации отраженных ими радиоволн.—221, 243

**Радиорелейная линия связи** — автоматически действующая линия связи с промежуточными приемно-передающими радиостанциями.—224

**Радиоспектрометр** — прибор для изучения спектров поглощения и излучения радиоволн молекулами.—385

**Радиоспектроскопический метод химического анализа** — анализ структуры сложных химических соединений, основанный на способности атомов поглощать радиоволны.—384

**Раздельное осаждение** — выделение вещества из раствора в виде осадка.—379

**Разрешенная орбита** — орбита электронов, соответствующая стабильному уровню энергии.—239

**Разрывная длина** — характеристика прочности материалов на разрывной длине стержня любого сечения из данного материала.—423, 424

**Разрядный шнур плазмы** — узкий канал наибольшей ионизации при разрядах молнии или в плазмотронах.—123

**Ракета** — летательный аппарат, движущийся под действием силы отдачи, которую создает струя отбрасываемых газов.—35, 37, 41, 42

**Раман,** Чандрасекара Венката (р.1888) — индийский физик.—547

**Рамзай,** Уильям (1852—1916) — английский химик и физик.—172, 316, 330, 546

**Рассеянные элементы**—химические элементы, не образующие в природе самостоятельные минералы.—450

**Реактивный двигатель** — двигатель, в котором сила тяги создается реакцией массы газа, отбрасываемой из сопла.—36

**Реальные газы.**—139—140,

**Редкие металлы** — встречаются в природе лишь как незначительные примеси в рудах других металлов.—449

**Резерфорд,** Эрнест (1871—1937) — знаменитый английский физик.—276, 280—282, 287, 296, 546, 547

**Резонанс** — резкое увеличение амплитуды вынужденных колебаний при совпадении собственной частоты колеблющегося тела с частотой действия внешней силы.—31, 100, 226

**Резонансные частицы** — элементарные частицы с очень коротким временем жизни.—269

**Релятивистская механика** — механика, основанная на законах теории относительности.—24, 32

**Релятивистские эффекты** — физические явления, проявляющиеся при скоростях, сравнимых со скоростью света.—33, 265

**Рёмер,** Оле (1644—1710) — датский астроном.—170, 543

**Рентген,** Вильгельм Конрад (1845—1923) — немецкий физик.—274, 538, 546

**Рентгеновские лучи.**—176, 274, 289, 368, 538, 546

**Рентгеноструктурный анализ** — раздел физики, изучающий строение тел при помощи рентгеновских лучей.—363

**Реомюр,** Рене Антуан (1683—1757) — французский естествоиспытатель.—531

**Реомюра шкала** — температурная шкала, в которой интервал между точками таяния льда и кипения воды разделен на 80 равных частей.—531

**Ридберг,** Иоганн Роберт (1854—1919) — шведский физик.—178

**Ридберга постоянная.**—178, 179

**Рихман,** Георг Вильгельм (1711—1753) — русский физик.—544

**Романовский,** Дмитрий Леонидович (1861—1921) — русский врач.—494

**«Ромашка»** — термоэлектрогенератор, работающий на атомной энергии.—302

**Ростовые вещества** — вещества, ускоряющие рост растений.—467

**Ротор** — вращающаяся часть электрогенератора.—209

**Рубин** — драгоценный камень, кристалл корунда, окрашенный благодаря примеси хрома в ярко-красный цвет.—180, 181

**Румкорф,** Генрих (1803—1877) — немецкий электротехник.—220

**Румкорфа катушка.**—213, 220

**Русское химическое общество** — научное общество, созданное в 1863 г. при Петербургском университете.—309, 313

**Рутил** — минерал, содержит 60% титана.—448

**Рэлей (Стретт),** Джон Уильям (1842—1919) — знаменитый английский физик.—315

# С

**Савар,** Феликс (1791—1841)—французский физик.—205, 545

**Сажень**—старинная русская мера длины = 2,133 *м*.—524, 531

**Салициловая кислота** — лекарственное вещество.—495

**Сарколизин** — противораковый препарат.—504

**Сахароза** — углевод, содержится во многих растениях.—507

**Сверхновые звезды** — звезды, светимость которых внезапно увеличивается в сотни миллионов раз, а потом медленно спадает.—294, 351, 368

**Сверхпроводимость** — полное исчезновение электрического сопротивления металлов, наблюдаемое при сверхнизких температурах.—118

**Сверхтекучесть** — свойство жидкого гелия при температуре ниже 2,17°К протекать без трения через узкие капилляры и щели.—119, 120, 547

**Свстовое давление** — механическое давление светового и электромагнитного излучения на тела.—177, 546

**Световой год** — астрономическая единица расстояния = $9{,}6 \cdot 10^{15}$ *м*.—525, 530

**Свеча** — единица силы света в СИ.—528

**Свободная энергия на границе тел.**—413

**СГС** — система измерений, основными единицами которой приняты сантиметр, грамм-масса и секунда.—525

**СГСЭ** — система измерений, аналогичная СГС, но с включением единиц измерения электростатических величин.—529

**Сдвига правило** — закон, определяющий изменение химической природы элемента при радиоактивном распаде.—318, 348

**Семенов,** Николай Николаевич (р. 1896)— советский физико-химик.—547

**Сенсибилизаторы** — вещества, повышающие чувствительность фотопленок и пластинок.—432

**Сервомотор** — силовое исполнительное устройство в системе автоматической регулировки машин или механизмов.—76

**СИ** — Международная система единиц.—524, 531

**Сиборг,** Глен Теодор (р. 1912) — американский физик и химик.—393, 537, 547

**Силоксаны** — кремнийорганические соединения, образуют полимерные молекулы, в которых чередуются связи между кремнием и кислородом.—486

**Симметрия** (в кристаллографии) — закономерность в расположении граней, ребер и вершин кристалла.—370

**Синдиотактические полимеры.**—479

**Синтетические каучуки** — искусственно получаемые вещества, по свойствам близкие к природному каучуку.—466

**Синхротрон.**—265

**Синхрофазотрон.**—265

**Сирена** — устройство для получения звуковых колебаний с помощью газовой струи.—110

**Ситаллы** — кристаллические стекла.—365, 422

**Складовская-Кюри,** Мария (1867—1934) — польский физик и химик, работала во Франции.—274, 317, 546

**Склонение магнитное** — угол между магнитным и географическим меридианами.—198

**Скобельцин,** Дмитрий Владимирович (р. 1892) — советский физик.—304

**Скорость звука** — скорость распространения звуковых волн; в воздухе при нормальных условиях = 330 *м/сек*.—94, 95, 545

**Скорость света** — скорость распространения световых волн; в вакууме = 299 792 *км/сек*.—33, 170, 171, 212, 547

**Смачивание** — растекание жидкости по поверхности твердого или жидкого тела.—413, 414

**Смещения закон** — закон Вина, определяющий, как изменяется распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела при изменении его температуры.—192, 546

**Содди,** Фредерик (1877—1956)—английский химик.—276, 277, 542, 546

**Сократ** (469—399 до н. э.)— древнегреческий философ.—543

**Соленоид** — см. Индуктивности катушка.

**Солнечная постоянная** — количество тепла, получаемое от Солнца на границе атмосферы Земли за 1 минуту на 1 $см^2$ поверхности, перпендикулярной лучам; равняется примерно 2 калориям (9,37 *дж*).—168

**Солнечный ветер** — поток плазмы, непрерывно стекающий с поверхности Солнца.—367

**Сольве,** Эрнест (1838—1922)—бельгийский химик.—545

**Солюбилизация.**—419

**Сополимер** — вещество, образующееся при полимеризации двух или нескольких различных мономеров.—485

**Сопротивление аэродинамическое** — сила, возникающая при движении тела в воздухе.—74

**Сорбент** — твердое тело или жидкость, поглощающие какое-либо вещество из газа или раствора.—386

**Сорбция** — поглощение веществ из растворов или газов твердыми телами или жидкостями.—386

**Сохранения импульса закон:** полное количество движения системы тел (или одного тела) остается постоянным, если нет действия внешних сил.—27

**Сохранения и превращения энергии закон**—энергия замкнутой материальной системы остается постоянной при любых процессах, происходящих в системе, и лишь превращается из одной формы в другую.—27, 545

**Сохранения массы закон**—общая масса веществ, вступающих в химическую реакцию, равна общей массе полученных веществ.—544

**Спекание** — получение пористых или компактных твердых материалов из порошкообразных или пылевидных.—424

**Спектр** — совокупность простых гармонических колебаний, на которые может быть разложено сложное колебательное движение.—171, 233

**Спектр поглощения** — распределение значений коэффициента поглощения света по частотам.—174

**Спектральный анализ** — качественный и количественный анализ состава вещества, основанный на изучении спектров испускания и спектров поглощения этих веществ.—322, 347, 381, 452, 545

**Спектрометр** — прибор для измерения оптических спектров.—175

**Спектроскоп** — прибор для наблюдения спектров.—172, 190, 380

**Спектрофотометр** — прибор для определения силы света в различных участках оптического спектра.—381

**Спектрофотометрия** — раздел оптики, изучающий зависимость интенсивности спектральных линий от длины волны.—381

**Спектры атомные** — спектры, испускаемые атомами при переходе в состояние с меньшей энергией.—322

**Спектры оптические:** сплошной, линейчатый, полосатый.— 171, 174, 178

**Спин** — собственный механический момент элементарной частицы, обусловленный ее квантовой природой.—35, 216, 269, 272, 324

**Спинтарископ** — прибор для подсчета сцинтилляций.—302

**Сплавы металлов.**— 442, 443

**Спонтанное деление** — самопроизвольный распад ядра на два осколка.—285, 286, 357, 361, 547

**Спутник Земли искусственный** — устройство, движущееся по замкнутой орбите вокруг Земли по инерции.—42

**Стабилизатор химический** — вещество, предотвращающее физические и химические изменения в другом веществе.—417

**Стадия** — мера расстояния в древнем мире — от 174,5 до 230,4 *м*.—531

**Сталь** — сплав железа с углеродом (до 2%).—443, 445, 446

**Стартовая масса** — сумма массы всех ступеней ракеты.—37

**Стас,** Жан Серве (1813—1891) — бельгийский химик.— 545

**Статистическая термодинамика** — раздел статистической физики, исследующий условия равновесия термодинамических систем. Статистическая физика — раздел физики, изучающий методами теории вероятности свойства тел и систем, состоящих из огромного количества отдельных частиц.—166, 170, 171

**Статор** — неподвижная часть электрической машины.—209

**Стевин,** Симон (1548—1620) — голландский математик и инженер.—83

**Стеклопластики** — пластические материалы, состоящие из синтетических смол и стекловолокон.—374, 488

**Степоверит** (стешевит) — минерал, модификация кварца.—135, 373

**Стерадиан**—единица измерения телесных углов.—528

**Стильб** — единица яркости в СГС = $10^4$ *нт*.—530

**Стокса сила** — сила сопротивления, которую испытывает движущееся твердое тело в вязкой среде.—214

**Столетов,** Александр Григорьевич (1839—1896) — русский физик.—217, 546

**Странные частицы** — группа элементарных частиц (гипероны и К-мезоны).—263, 268, 355

**Стратостат** — воздушный шар, оборудованный для подъема человека в стратосферу.—65

**Стратосфера** — часть атмосферы, лежащая между 8—17 *км* и 40 *км* над уровнем моря.—223

**Структурная теория** — теория химического строения органических веществ, предложенная Бутлеровым.—460, 474, 545

**Сульфамидные препараты** — сильно действующие антибактериальные препараты.—495

**Сульфаты** — соли серной кислоты.—431

**Сульфидин** — лекарственный препарат.—495

**Сульфиды** — соли сероводородной кислоты.—431

**Супергетеродинный приемник** — радиоприемник, в котором колебания сигнала преобразуются в колебания промежуточной частоты.— 232

**Суспензия** — система из твердых частиц, взвешенных в жидкой среде.—417

**Сцинтилляционный счетчик** — прибор для отсчета заряженных микрочастиц. —303

**Сцинтилляция** — вспышка света, возникающая при прохождении заряженной частицы через люминофор.—51, 281, 302

# Т

**Тамм,** Игорь Евгеньевич (р. 1895) — советский физик.—185, 547

**Тембр** — особенность звучания голоса или музыкального инструмента, зависящая от обертонов.—101

**Температура плавления** — температура перехода вещества из кристаллического состояния в жидкое.—363

**Тепловое движение молекул** — беспорядочное движение молекул, лежащее в основе явления теплоты.—421

**Тепловой барьер** — предел скорости самолета, при которой прочность материалов, применяемых в самолетостроении, резко падает из-за перегрева от трения воздушной среды.—68, 447

**Теплоемкость** — количество тепловой энергии поглощаемой телом при нагревании на 1°Ц.—164

**Теплород.**—143, 145

**Теплота превращений** — количество теплоты, нужное для перехода вещества из одного состояния в другое или освобождающееся при таком переходе.—164

**Теренин,** Александр Николаевич (р. 1896) — советский физико-химик.—190

**Термистор** — полупроводниковый термометр.—250, 528

**Термодинамики законы:** термического равновесия.—150, первый.— 150, второй.— 154—160, третий.— 166

**Термопара** — устройство для измерения высоких температур.— 257, 258, 528

**Термоскоп** — устройство для наблюдения разности температур.—142

**Термостат** — устройство для поддерживания постоянной температуры.—387

**Термоэлектрогенератор** — полупроводниковое устройство, превращающее тепловую энергию непосредственно в электрическую.—257, 302, 376

**Термоэлектронная эмиссия** — испускание электронов нагретыми твердыми телами.—229

**Термоядерный процесс** — синтез более тяжелых ядер из более легких, происходящих при сверхвысокой температуре.—122

**Тесла,** Никола (1856—1943) — югославский электротехник.—207

**Тетрод** — четырехэлектродная электронная лампа.—232

**Тефлон.**—481

**Технеций** — искусственно полученный химический элемент № 43.—336, 337, 537, 547

**Тироксин** — гормон щитовидной железы.—493

**Ток насыщения** — электрический ток, сила которого не возрастает при увеличении разности потенциалов.—231

**Ток смещения.**—211

**Ток электрический** — направленное движение электрических зарядов.—203, 204, 210

**Токсофорная группа** — группа атомов, ядовитая для определенного вида микробов.—494

**Томсон,** Уильям — см. Кельвин.

**Тон** — звук, обладающий определенной высотой.—101

**Тонна** — мера массы = 1000 *кг*.—529

**Торричелли,** Эванджелиста (1608—1647) — итальянский физик и математик.—543

**Точечные дефекты** — нарушения правильной структуры кристалла в отдельных узлах.—373

**Транзистор.**—237, 376

**Трансурановые элементы** — искусственно получаемые химические элементы; в периодической таблице находятся в конце после урана.—283, 334, 338, 391

**Трек** — след, оставляемый движущейся микрочастицей.—266, 302, 360

**Тренажер** — устройство для тренировки летчика.—78

**Третник** — сплав свинца и олова.—443

**Триод** — трехэлектродная электронная лампа.—230, 231, 234

**Трипсин** — фермент, образующийся в кишечнике.—509

**Тритий** — тяжелый радиоактивный изотоп водорода.—277, 511, 514

**Тропический год** — временной промежуток между прохождениями Солнца через точку весеннего равноденствия = 365, 242 суток.—527

**Тропосфера** — нижний слой атмосферы, простирающийся до 8—17 *км* над уровнем моря.—223

**Туаз** — старинная французская мера длины = 1,97 *м*.—53

**Туполев,** Андрей Николаевич (р. 1888) — советский авиаконструктор.—72, 74

**Тяжелая вода** — вода, в которой обычный водород заменен его тяжелым изотопом — дейтерием.—367, 368, 511—515

## У

**Уатт,** Джемс (1736—1819) — английский изобретатель.—529, 544

**Углеводороды.**—456

**Углеводы.**—458, 505

**Угол атаки** — угол между направлением движения самолета и осью профиля в его крыле.—66

**Ударная волна** — звуковая волна, возникающая при распространении сжатия в газообразной среде со скоростью, превышающей скорость звука в этой среде.—67, 68, 100

**Удельная нагрузка на крыло** — вес самолета, приходящийся на 1 $м^2$ поверхности крыла.—74

**Удельный вес** — отношение веса тела к его объему; в СИ заменен понятием плотности.—82

**Удельный вес двигателя** — вес двигателя, приходящийся на единицу мощности.—72

**Узел**—мера скорости движения судов=1,852 *км/час*.—91, 530

**УКВ** — ультракороткие радиоволны.—222, 235

**Ультразвук** — очень короткие звуковые волны с частотами больше 20 *кгц*.—93, 108

**Ультразвуковой дефектоскоп** — прибор для обнаружения дефекта в изделии.—111

**Ультрафиолетовые лучи** — электромагнитные излучения с длиной волны от 4000 до 20 Å.—176, 367

**Умов,** Николай Алексеевич (1846—1915) — русский физик и математик.—97, 213, 545

**Униполярная машина** — электрическая машина постоянного тока.—209

**Усилитель** (в радиотехнике) — устройство, увеличивающее напряжение или мощность подведенных к аппарату электромагнитных колебаний.—224, 227

**Ускорители** — установки, в которых элементарным частицам, атомным ядрам и ионам сообщается большая энергия.—215, 264, 547

## Ф

**Фабрикант,** Валентин Александрович (р. 1907) — советский физик.—219, 547

**Фазотрон.**—265

**Фарада** — единица электрической емкости в СИ.—525, 529

**Фарадей,** Майкл (1791—1867) — английский физик.— 204, 206, 210, 214, 220, 529, 545

**Фарадея число** — количество электричества, которое, проходя через электролит, выделяет на электродах 1 грамм-эквивалент вещества.—204

**Фаренгейт,** Даниель Габриель (1686—1736) — немецкий физик.—143

**Фаренгейта шкала** — температурная шкала, в которой интервал между точками таяния льда (32°) и кипения воды (212°) разделен на 180 равных частей.—531

**Фаянс,** Казимеж (р. 1887) — польский физико-химик.—277, 546

**Федоров,** Евграф Степанович (1853—1919) — русский минералог и кристаллограф.—546

**Фенол** — органическое соединение ароматического ряда.—467

**Ферменты** — органические катализаторы, действующие в живых организмах.—261, 458, 491, 506

**Ферми,** Энрико (1901—1954) — итальянский физик.—270, 282, 283, 341, 547

**Фермий** — искусственно полученный химический элемент № 100.—341, 357, 393

**Фермионы** (ферми-частицы) — элементарные частицы.—270

**Ферромагнетики** — вещества, способные намагничиваться в слабых магнитных полях.—118, 216

**Ферсман,** Александр Евгеньевич (1883—1945) — русский минералог и геохимик.—450

**Физо,** Ипполит Луи (1819—1896) — французский физик.—212, 545

**Флаттер.**—78

**Флеминг,** Александер (1881—1955) — английский бактериолог.—547
**Флеров,** Георгий Николаевич (р. 1913) — советский физик.—284, 285, 547
**Флогистон.**—143, 145, 543
**Флотация** — метод обогащения руд.—415
**Фокус** — точка, в которой собирается прошедший через оптическую систему пучок световых лучей, падающих параллельно главной оси системы.—172
**Фонограф** — прибор для записи и воспроизведения звуков.—106
**Форсажная камера** — полость в реактивном двигателе, в которой дожигается горючее.—73
**Фосфоресценция** — см. Люминесценция.
**Фот** — единица освещенности = $10^4$ *лк*.—530
**Фотон** — элементарная частица (квант света).—177, 191, 267, 268, 272, 323, 353, 546
**Фотосинтез.**—20, 261, 390, 404
**Фотосопротивление** — полупроводниковое устройство для изменения силы тока при помощи света.—192, 251
**Фотосфера** — видимый нами слой солнечной атмосферы.—174
**Фотохимия** — раздел химии, изучающий химические процессы, протекающие под воздействием световых и ультрафиолетовых излучений.—403
**Фотоэлектрический порог** — максимальная длина волны, достаточная для появления фотоэффекта.—217
**Фотоэлектрический эффект.**—107, 191, 192, 217, 546
**Фотоэлемент** — прибор, преобразующий световую энергию в электрический ток.—107, 192, 259
**Фотоэмульсионная камера** — прибор для исследования траекторий космических частиц, попадающих в слои фотоэмульсии.—306
**Франк,** Илья Михайлович (р. 1908) — советский физик.—185, 547
**Франклин,** (Бенджамин) Вениамин (1706—1790) — американский ученый и политический деятель.—202,544
**Фраунгофер,** Йозеф (1787—1826) — немецкий физик.—174, 189, 544
**Фраунгоферовы линии** — темные линии в спектре Солнца.—174, 189, 544
**Френель,** Огюстен Жан (1788—1827) — французский физик.—545.
**Фуко,** Жан Бернар Леон (1819—1866) — французский физик.—212, 545
**Фультон,** Роберт (1765—1815) — американский изобретатель.—90
**Функциональная группа** — группа атомов, которые определяют химический характер вещества.—479
**Фунт** — старинная мера массы; русский фунт = 409,5 *г*; английский фунт — 453,6 *г*.—531
**Фут** — старинная мера длины = 0,3048 *м*.—206, 531

# X

**Хевисайд,** Оливер (1850—1925) — английский физик.—223
**Химиотерапия** — лечение инфекционных болезней химическими препаратами.—493
**Химическая кинетика** — раздел химии, изучающий скорости и механизмы химических реакций.—398
**Хиназол** — бактерицидный препарат.—463
**Хинин** — лекарственное вещество.—460, 494, 547
**Хитин** — углевод, из которого строится наружный скелет ракообразных и насекомых.—458
**Хлорофилл**—зеленый пигмент растений.—385,508,547
**Христианович,** Сергей Алексеевич (р. 1908) — советский физик.—67
**Хроматограмма.**—386, 387
**Хроматографический анализ** — химический анализ с помощью хроматографии.—385—396, 546
**Хромосфера** — один из слоев атмосферы Солнца.—174
**Хронометр** — точные переносные часы.—527

# Ц

**Цвет,** Михаил Семенович (1872—1919) — русский ботаник и биохимик.—385, 546
**Целлюлоза** — см. Клетчатка.
**Цельсий,** Андерс (1701—1744) — шведский астроном и физик.—114, 143
**Цельсия шкала** — температурная шкала, в которой интервал между точками таяния льда и кипения воды разбит на 100 градусов.—114, 160, 528
**Центнер** — мера массы = 100 *кг*.—529
**Цепная реакция** — реакция, в результате которой образуются продукты, вызывающие ее продолжение.—284, 297, 402, 547
**Цикл термодинамический** — изменение системы, в результате которого она приходит точно в первоначальное состояние.—154
**Циклотрон** — ускоритель тяжелых заряженных микрочастиц.—265, 358
**Циолковский,** Константин Эдуардович(1857—1935)—советский ученый и изобретатель.—35, 546
**Циолковского число** — отношение стартовой массы ракеты к ее весу в конце работы двигателя.—37

# Ч

**Чай Лунь** (II в. н. э.)— китайский ученый.— 543
**Чаплыгин,** Сергей Алексеевич (1869—1942) — советский физик.—67
**Частота волны** — число колебаний в 1 *сек*.—93
**Частота электромагнитных колебаний** — число изменений направления электрического тока в излучателе электромагнитных волн в единицу времени.—221
**Чэдвик,** Джемс (р. 1891) — английский физик.—282, 296, 547
**Черенков,** Павел Алексеевич (р. 1904) — советский физик.—183—185, 306, 547
**Черенкова — Вавилова эффект** — электромагнитное излучение, возникающее при движении заряженных частиц со скоростью, превышающей скорость света в данной среде.— 185, 306, 547
**Черенкова счетчик** — прибор для счета быстрых заряженных микрочастиц, основанный на эффекте Черенкова.—306
**Чугун** — сплав железа с углеродом (свыше 2%).—443, 444

# Ш

**Шееле,** Карл Вильгельм (1742—1786) — шведский химик.—544
**Шредингер,** Эрвин (1887—1961) — австрийский физик.—547
**Шталь,** Георг Эрнест (1660—1734) — немецкий химик и врач.—543
**Штоф** — старинная мера жидкости = 1,23 *кг*.—531

# Э

**Эвклид из Мегары** (III в. до н. э.) — древнегреческий математик.—543

**Эдисон,** Томас Альва (1847—1931) — американский изобретатель.—106, 204, 228

**Эйлер,** Леонард (1707—1783) — швейцарский математик и физик, в 1727—1741 и 1766—1783 гг. работал в России.—544

**Эйнштейн,** Альберт (1879—1955) — великий немецкий физик.—24—32, 170, 171, 216, 218, 287, 341, 546, 547

**Эйнштейний** — искусственно полученный химический элемент № 99.—341, 547

**Экзотермическая реакция** — реакция, протекающая с выделением тепла.—397

**Экспонометр** — прибор для определения экспозиции при фото-и киносъемках.—259

**Экстракция** — извлечение вещества растворителем из смеси.—379

**Электрическая дуга** — см. Вольтова дуга.

**Электрическая постоянная вакуума.**— 210

**Электродвижущая сила** (ЭДС) — причина, вызывающая и поддерживающая электрический ток в замкнутой цепи.—204, 409, 545

**Электролиз** — разложение растворов или расплавов при прохождении через них постоянного тока.— 204, 407, 544, 546

**Электролитическая диссоциация** — полный или частичный распад растворенных веществ—электролитов (например, солей) на ионы.—546

**Электролиты** — растворы или расплавы, способные проводить электрический ток.—204, 406, 410

**Электромагнитное поле** — физическое поле, осуществляющее взаимодействие между электрическими зарядами.—369, 370, 546, 547

**Электрон** — устойчивая элементарная частица.— 214, 263, 266, 268—272, 353, 368

**Электрона заряд.** — 546

**Электрон-вольт** — единица энергии в атомной и ядерной физике; энергия, которую приобретает электрон, проходя через ускоряющую разность потенциалов в 1 вольт $=1{,}602 \cdot 10^{19}$ *дж*.—122, 529

**Электроника** — наука об электронных процессах в вакууме и газах.—214

**Электронное облако** — совокупность свободных электронов, возникающая между катодом и сеткой триода.— 230

**Электроннолучевая трубка** — прибор, применяемый в телевизорах.—237, 238

**Электронно-оптический преобразователь** — прибор, преобразующий световое изображение в электрическое, а затем электрическое — в видимое.— 192

**Электронные полупроводники.**—249, 375

**Электронный газ.**—247, 271

**Электронный микроскоп** — прибор для увеличения изображений с помощью быстрых электронов.— 195

**Электроны валентные** — электроны на внешней оболочке атома, активно участвующие в химических реакциях.—247

**Электроны свободные** — внешние электроны, оторвавшиеся от своих атомов и образующие электронный газ.—406

**Электропроводность** — свойство веществ проводить электрический ток.—375, 442, 443

**Электроскоп** — прибор для обнаружения электризации тел.—263

**Электростатическое взаимодействие** — притяжение и отталкивание электрических зарядов, находящихся на расстоянии друг от друга.—515

**Электрохимия** — раздел физической химии, изучающий связь между электрическими и химическими процессами.—403, 405—412

**Элементарная ячейка** — 372

**Элероны** — рули самолета, служащие для выравнивания крена.—75

**Элинвар** — сплав железа с никелем, хромом и углеродом.—443

**Эмиттер** — один из электродов полупроводникового триода.—254, 255

**Эмиссия катода** — испускание катодом электронов.— 245

**Эмульгирование** — превращение веществ в эмульсию.—418

**Эндотермическая реакция** — химическая реакция, сопровождающаяся поглощением тепла.—397

**Энергетические уровни в атоме** — значения энергии атома в различных состояниях.—239, 374, 375

**Энергия активации** — энергия, которой должны обладать молекулы, чтобы осуществилась химическая реакция.—399

**Энергия связи** — энергия, выделяющаяся при образовании атомного ядра из нуклона за счет дефекта массы.— 298

**Энтропия.**—160—167, 545

**Эпиплазма.**— 369

**Эрг** — единица работы и энергии в СГС$=10^{-7}$ *дж*.— 530

**Эрленмейер,** Рихард Август (1825—1909) — немецкий химик-органик.—460

**Эрлих,** Пауль (1854—1915) — немецкий бактериолог и биохимик.—436, 494

**Эрстед**— единица напряженности магнитного поля.— 529

**Эрстед,** Ханс Кристиан (1777—1851) — датский физик.—204, 206, 544

**Эталон** — образцовая мера, служащая для воспроизводства, хранения и получения единиц измерения с наивысшей точностью.—525

**Эфиры.**— 472

**Эхо** — отражение звуковой или радиоволны.—95, 110, 543

**Эхолот** — прибор для автоматического измерения глубины ультразвуковыми волнами.—110

# Ю

**Юкава,** Хидеки (р. 1907) — японский физик.—282

**Юнг,** Томас (1773—1829)—английский физик, врач и астроном.— 544

# Я

**Яблочков,** Павел Николаевич (1847 — 1894)— русский электротехник.—204

**Ядерная химия** — раздел науки, исследующий превращения атомных ядер и свойства атомов, полученных в результате превращений.— 348

**Якоби,** Борис Семенович (1801—1874) — русский физик.—204, 545

**Ядро атома** — положительно заряженная центральная часть атома.—280, 547

**Ярд** — английская мера длины = 0,914 *м*.—531

**Яркость** — характеристика излучения светящейся поверхности.—180, 529

# К ЧИТАТЕЛЯМ

«Счастливого пути вам, путешественники в третье тысячелетие». Этими добрыми и мудрыми словами старого большого ученого открывается первый том вашей энциклопедии. Не забывайте их никогда.

Ведь это вам, наши читатели, предстоит прокладывать путь в светлое будущее — в коммунизм. Будьте же к этому готовы. Желаем вам удачи на трудной дороге.

Мы, все те, кто работал над этим томом Детской энциклопедии, твердо уверены, что среди вас, среди сотен тысяч советских ребят, есть замечательные будущие мастера, талантливые конструкторы, инженеры, даже гениальные ученые. Кем-нибудь из них, наверное, станешь и ты — тот, который держит сейчас в руках эту книгу и читает эти строки. Ведь это только от тебя зависит. Мы и тебе желаем удачи.

Как много интересного ждет вас, как много неведомого вы узнаете, как много невиданного увидите, как много сделаете, изобретете и построите!

Сколько новых загадочных тайн природы вам предстоит открыть! Но имейте в виду, что природа — суровый и безжалостный противник. Свои тайны она без борьбы не отдает. Покорять ее может только сильный. И вы, строители будущего, обязаны стать сильными.

Правда, одной только силой такого могучего противника не одолеть. Нужно еще стать смелым, научиться не испытывать страха перед сложным и трудным, не отступать перед ними. Но и этого мало. Придется, кроме того, стать умелым. Нужно научиться умению применять свою силу. Только тогда можно будет рассчитывать на победу в тяжелой борьбе.

В наше время самая могучая сила в мире — это знание. И вы должны, обязаны много з н а т ь.

Некоторым из вас иногда, наверное, кажется, что наука — удел немногих, избранных. Это заблуждение. Уже в наши дни наука становится могучей производительной силой и грань между наукой и производством стирается быстро. Теперь иной раз прибор ученого-физика, например циклотрон, не отличишь от большого завода. А на многих химических заводах уже и теперь важнейшим цехом становятся электронные счетно-решающие машины, с помощью которых рабочие ведут технологический процесс. Так кто же будет работать на заводах и в лабораториях недалекого будущего — рабочие или ученые? А велика ли между ними будет разница? Ведь и тот и другой — каждый в своей области — должны будут очень много знать. Только тогда они смогут успешно работать, где бы и кем бы ни пришлось им трудиться. Знание необходимо всем вам, строителям прекрасного будущего. Оно — ваша сила.

Но помните, знание тоже может быть разным. Можно вызубрить таблицу умножения и не суметь решить простенькую задачку. Можно затвердить все законы Ньютона и стоять в беспомощном недоумении перед простым станком, не понимая, как он работает. Можно знать назубок все законы физики и не уметь рассчитать или починить обмотку электромотора или дома сделать проводку.

Только знать — мало. Нужно еще у м е т ь применять свои знания. В этом вам может помочь математика. Помните, что за значками и буквами ее сложных формул стоят великие логические законы, которым подчиняется все, что совершается в мире.

Не бойтесь выводов, уравнений и формул. Преодолейте их кажущуюся сложность. Тогда они всегда будут вашими друзьями и помощниками. Тот, кто научится свободно пользоваться удивительным языком математики, только тот и сможет допрашивать природу, ставить перед ней вопросы о ее тайнах и понимать ее ответы. А ведь в этом и состоит главная задача ученого. Конечно, это очень трудно. Но чем труднее задача, тем она интереснее. Даже и в этой книге не все для вас сразу будет легким и понятным. Придется проявить настойчивость и упорство, снова и снова возвращаться к иным, особенно сложным разделам. Не поняли сразу — прочтите еще раз, в конце концов поймете.

Спасибо великим ученым — разведчикам истины за их героический самоотверженный труд. Для вас они разведали и сделали ясными скрытые и таинственные законы природы. И вам придется потратить немало усилий, чтобы эти законы понять и хорошо усвоить. Это совершенно необходимо, иначе не сможете идти вперед. Новые задачи, которые встанут перед вами, будут очень сложны и трудны. Не бойтесь их. Будьте к ним готовы.

Каждая область знания интересна. Каждая специальность важна и необходима. Каждая работа почетна. Пусть одни решат стать биологами, других увлечет медицина, третьих — искусство. Каждого в жизни влечет свое.

Но кто-нибудь из вас обязательно выберет для себя ту дорогу в жизни, которая, как мы в этом уверены по собственному опыту, гораздо увлекательней и интересней, чем любая другая.

Это — познание вещества, исследование, как и по каким законам оно устроено.

Это — поиск неведомого в глубинах космоса и микромира.

Это — поиск неисчерпаемых источников энергии. Без них не сможет обойтись человек будущего.

Это — создание новых элементов, новых веществ, новых материалов, новых конструкций, новых машин.

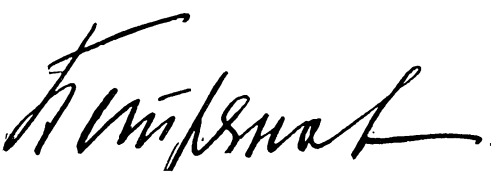
Это — стремление повысить точность измерений, которая расширит границы познания.

Тяжелый повседневный труд ждет вас на этом пути. Он потребует от вас большой самоотверженности, твердости, упорства, увлечения и преданности. Вас ждут горечь и разочарование неизбежных заблуждений и ошибок.

Того, кто сумеет развить у себя зоркий взгляд и умение подмечать великое в малом и неведомое в повседневном, того, кто воспитает в себе смелость в постановке проблемы и достижении решения, каким бы безнадежным оно ни казалось, ждет на этом пути великая радость открытия нового, радость победы.

Из того немногого, что мы смогли вам рассказать в этой книге о том, что сделали в науке о веществе ваши великие предшественники, вы должны понять, какие могучие силы и какие неограниченные возможности вы получили в наследство. Вам открыта дорога в космос. Для вас добыта энергия атома.

От вас зависит, как вы это используете. Великая ответственность за будущее мира лежит на вас. Не забывайте о ней.



## Условные обозначения и сокращения

Å — ангстрем
*а* — ампер
*атм* — атмосфера
*б* — бел
в.— век
*в* — вольт
вв.— века
*вт* — ватт
г.— год
*г* — грамм
*га* — гектар
*гц* — герц
Δ — прирост переменной величины за определенный период
*дб* — децибел
до н. э.— до нашей эры
*g* — ускорение силы тяжести
и т. д.— и так далее
и т. п.— и тому подобное
°К — градус по шкале Кельвина
*кал* — калория
*квт* — киловатт
*кг* — килограмм
*кгс* — килограмм-сила (вес)
*кгц* — килогерц
*ккал* — килокалория
*км* — километр
к. п. д.— коэффициент полезного действия
Л.— Ленинград (в библиографическом указателе)
*л. с.*— лошадиная сила
М.— Москва (в библиографическом указателе)
*M* — число Маха, отношение скорости предмета к скорости звука
*м* — метр
*ма* — миллиампер
*мг* — миллиграмм
*Мгц* — мегагерц
*мк* — микрон
млн.— миллион
млрд.— миллиард
*мм* — миллиметр
*ммк* — миллимикрон
*мс* — миллисекунда
*Мэв* — миллион электрон-вольт
*н* — ньютон
ок. — около
*с* — скорость света
*сек* — секунда
СИ — Международная система единиц измерения
*см* — сантиметр
*т* — тонна
т. е.— то есть
тыс.— тысяч
°Ф — градус по шкале Фаренгейта
°Ц — градус по шкале Цельсия
*эв* — электрон-вольт
ЭДС — электродвижущая сила
° — градус окружности
′ — минута окружности
″ — секунда окружности

Внешнее оформление книги художников
Д. С. Бисти и Ф. Б. Збарского.

Иллюстрации в тексте выполнили художники:

Р. Ж. Авотин, Г. Е. Валетов, Л. С. Вендров, С. Н. Волков, Н. И. Гришин, Б. И. Жутовский, Д. А. Лисичкин, Ю. А. Макаренко, Б. А. Малышев, Б. А. Попов, Г. В. Северденко, О. М. Туркус.

■

Старший редактор **М. Н. Ложечко.**
Редактор **И. В. Разгуляева.**
Спецредакторы **В. И. Козлов** и **Д. Н. Трифонов.**
Контрольные редакторы **Д. М. Алексеев** и **Н. П. Мостовенко.**
Старший художественный редактор **Е. Б. Шапалина.**
Макет книги и техническое редактирование старшего художественного редактора **Н. П. Самохваловой.**
Корректоры **В. С. Антонова** и **Е. А. Блинова.**

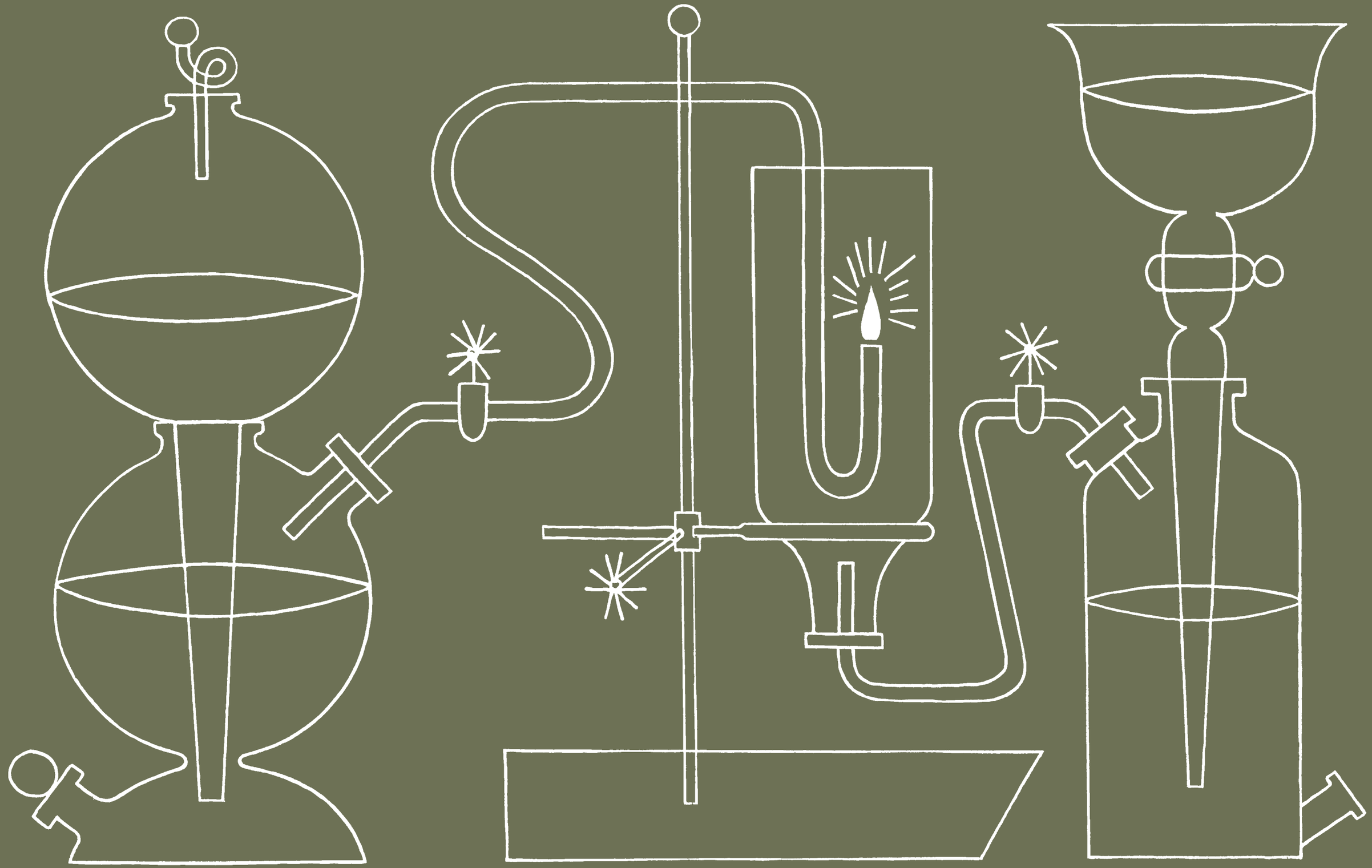
■

Сдано в набор 14/VI 1965 г. Подписано к печати 22/III 1966 г. Формат 84×108 $^{1}/_{16}$. Печ. л. 39,5 (66,36). Уч.-изд. л. 76,02. Тираж 500 000 экз. (1 завод 1—225000) ТО 1465

**Цена 2 р. 55 к.**

Издательство «Просвещение» Комитета по печати при Совете Министров РСФСР. Редакция Детской энциклопедии. Адрес редакции: Москва, Ж-28, Хохловский пер., д. 16.

■

Цветные вклейки отпечатаны Первой Образцовой типографией им. А. А. Жданова и Калининским полиграфкомбинатом.

Московская типография № 2 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Москва, проспект Мира, 105. Зак. 436